

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2003 年 1 月 23 日 (23.01.2003)

PCT

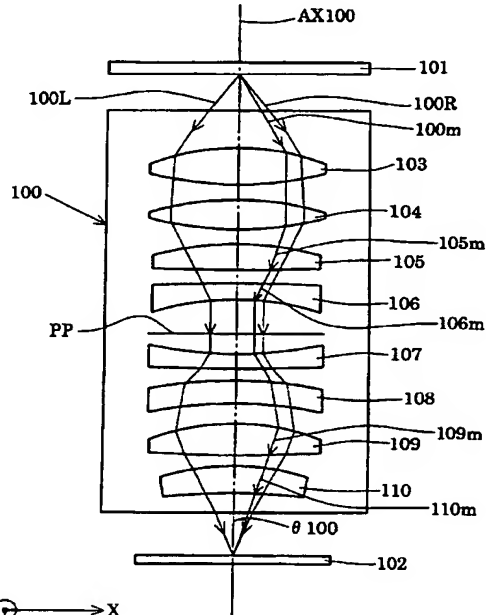
(10) 国際公開番号  
WO 03/007046 A1

- (51) 国際特許分類<sup>7</sup>: G02B 13/24, (72) 発明者: 白石 直正 (SHIRAISHI, Naomasa); 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 株式会社ニコン内 Tokyo (JP).
- (21) 国際出願番号: PCT/JP02/06964
- (22) 国際出願日: 2002 年 7 月 9 日 (09.07.2002) (74) 代理人: 山口 孝雄 (YAMAGUCHI, Takao); 〒101-0048 東京都千代田区神田司町二丁目10番地 第一ビル Tokyo (JP).
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願2001-208713 2001 年 7 月 10 日 (10.07.2001) JP  
特願2001-214442 2001 年 7 月 13 日 (13.07.2001) JP
- (71) 出願人: 株式会社ニコン (NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒100-8331 東京都千代田区丸の内三丁目2番3号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国 (国内): AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

[続葉有]

(54) Title: OPTICAL SYSTEM AND EXPOSURE APPARATUS HAVING THE OPTICAL SYSTEM

(54) 発明の名称: 光学系および該光学系を備えた露光装置



(57) Abstract: An optical system having a favorable optical performance without being substantially influenced by birefringence even if a birefringent crystal material such as fluorite is used. The optical system (100) comprises crystal optical elements composed of crystals of a cubic system. The crystal optical devices include crystal optical elements (105, 106) the first crystal axes of which are aligned with the optical axis and crystal optical elements (109, 110) the second crystal axes of which are aligned with the optical axis. In order to substantially avoid the influence of birefringence, a first total evaluation value  $\sum R_j$  that is the total of first evaluation values  $R_j$  concerning the crystal optical elements is in a predetermined relation, about the light rays of the image forming light beam focused at least at a given point on the image plane of the optical system or on an object, with a second total evaluation value  $\sum S_j$  that is the total of second evaluation values  $S_j$  concerning the crystal optical elements.

[続葉有]

WO 03/007046 A1



(84) 指定国 (広域): ARIPO 特許 (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア特許 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ特許 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, SK, TR), OAPI 特許 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

(57) 要約:

たとえば蛍石のような複屈折性の結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することのできる光学系。立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系 (100)。第1結晶軸が光軸に一致する結晶光学素子 (105, 106) と、第2結晶軸が光軸に一致する結晶光学素子 (109, 110) とを備えている。複屈折の影響を実質的に回避するために、複数の結晶光学素子に関する第1の評価量 $R_j$ の総和である第1の総和評価量 $\Sigma R_j$ と、複数の結晶光学素子に関する第2の評価量 $S_j$ の総和である第2の総和評価量 $\Sigma S_j$ とが、光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結像光束中の光線について所定の関係にある。

- 1 -

## 明 細 書

## 光学系および該光学系を備えた露光装置

## 技術分野

本発明は、光学系および該光学系を備えた露光装置に関し、特に半導体素子や液晶表示素子などのマイクロデバイスをフォトリソグラフィ工程で製造する際に使用される露光装置に好適な投影光学系に関するものである。

## 背景技術

半導体集積回路や液晶ディスプレイ等の電子デバイス（マイクロデバイス）の微細パターンの形成に際して、形成すべきパターンを4～5倍程度に比例拡大して描画したフォトマスク（レチクルとも呼ぶ）のパターンを、投影露光装置を用いてウエハ等の感光性基板（被露光基板）上に縮小露光転写する方法が用いられている。この種の投影露光装置では、半導体集積回路の微細化に対応するために、その露光波長が短波長側へシフトし続けている。

現在、露光波長はKrFエキシマレーザーの248nmが主流となっているが、より短波長のArFエキシマレーザーの193nmも実用化段階に入りつつある。さらに、波長157nmのF<sub>2</sub>レーザーや波長126nmのAr<sub>2</sub>レーザー等の、いわゆる真空紫外域と呼ばれる波長帯の光を供給する光源を使用する投影露光装置の提案も行なわれている。また、投影光学系の大開口数（NA）化によっても高解像度化が可能であるため、露光波長の短波長化のための開発だけでなく、より大きい開口数を有する投影光学系の開発もなされている。

このように波長の短い紫外域の露光光に対しては、透過率や均一性の良好な光学材料（レンズ材料）は限定される。ArFエキシマレーザーを光源とする投影光学系では、レンズ材料として合成石英ガラスも使用可能であるが、1種類のレンズ材料では色収差の補正を十分に行うことができないので、一部のレンズにフッ化カルシウム結晶（蛍石）が用いられる。一方、F<sub>2</sub>レーザーを光源とする投

影光学系では、使用可能なレンズ材料は事実上フッ化カルシウム結晶（蛍石）に限定される。

最近、このように波長の短い紫外線に対しては、立方晶系であるフッ化カルシウム結晶（蛍石）においても、複屈折が生じることが報告されている。電子デバイスの製造に用いられる投影光学系のような超高精度の光学系においては、レンズ材料の複屈折に伴って生じる収差は致命的であり、複屈折の影響を実質的に回避したレンズ構成およびレンズ設計の採用が不可欠である。

#### 発明の開示

本発明は、前述の課題に鑑みてなされたものであり、たとえば蛍石のような複屈折性の結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を確保することのできる光学系および該光学系を備えた露光装置を提供することを目的とする。

また、本発明は、結晶材料を用いて良好な光学性能を有する光学系が搭載された露光装置を用いて、高解像度の露光技術にしたがって高性能のマイクロデバイスを製造することのできるマイクロデバイス製造方法を提供することを目的とする。

前記課題を解決するために、本発明の第1発明では、立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記複数の結晶光学素子は、第1結晶軸が前記光学系の光軸にほぼ一致するように設定された結晶光学素子と、前記第1結晶軸とは異なる第2結晶軸が前記光軸にほぼ一致するように設定された結晶光学素子とを備え、

前記複数の結晶光学素子 $G_j$ は、前記光軸と直交する面内にある所定の結晶軸の方向が、前記面内にある所定の軸の方向に対して、前記光軸を中心として角度 $\rho_j$ 回転して配置され、

前記複数の結晶光学素子 $G_j$ を通過する特定の光線について、該特定の光線が前記光軸の方向となす角度を $\theta_j$ とし、前記特定の光線が前記所定の軸の方向となす角度を $\phi_j$ とし、前記特定の光線の光路長を $L_j$ としたとき、前記結晶の物

性定数  $\alpha$  と、前記光軸とほぼ一致する結晶軸と、前記角度  $\rho_j$  と、前記角度  $\theta_j$  と、前記角度  $\phi_j$  と、前記光路長  $L_j$  とから定まる第 1 の所定の偏光に対する第 1 の評価量  $R_j$  および第 2 の所定の偏光に対する第 2 の評価量  $S_j$  が規定され、

前記複数の結晶光学素子に関する前記第 1 の評価量  $R_j$  の総和である第 1 の総和評価量  $\Sigma R_j$  と、前記複数の結晶光学素子に関する前記第 2 の評価量  $S_j$  の総和である第 2 の総和評価量  $\Sigma S_j$  とが、前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の 1 点に集光する結像光束中の光線について所定の関係にあることを特徴とする光学系を提供する。

第 1 発明の好ましい態様によれば、前記第 1 の評価量  $R_j$  は、前記第 1 の所定の偏光に対する光路長変化情報であり、前記第 2 の評価量  $S_j$  は、前記第 2 の所定の偏光に対する光路長変化情報である。また、前記第 1 の所定の偏光は、前記光軸を中心とした円の径方向に偏光方向を有する R 偏光であり、前記第 2 の所定の偏光は、前記光軸を中心とした円の周方向に偏光方向を有する  $\theta$  偏光であることが好ましい。さらに、前記所定の関係は、前記第 1 の評価量  $R_j$  の総和が前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の 1 点に集光する結像光束中の光線についてほぼ等しい関係と、前記第 2 の総和評価量  $\Sigma S_j$  が前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の 1 点に集光する結像光束中の光線についてほぼ等しい関係と、前記第 1 の評価量  $R_j$  の総和と前記第 2 の総和評価量  $\Sigma S_j$  とが前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の 1 点に集光する結像光束中の光線について互いにほぼ等しい関係とを含むことが好ましい。

また、第 1 発明の好ましい態様によれば、前記光軸と結晶軸  $[111]$  または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された結晶光学素子  $G_j$  において、前記所定の結晶軸は結晶軸  $[-110]$  または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸であり、 $\omega_j = \phi_j - \rho_j$  としたとき、前記第 1 の評価量  $R_j$  および前記第 2 の評価量  $S_j$  は、

$$R_j = \alpha \times L_j \times [56 \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} - 32\sqrt{2} \times \sin(4\theta_j) \times \sin(3\omega_j)] / 192$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times [32 \times \{1 - \cos(2\theta_j)\}]$$

$$+64\sqrt{2}\times\sin(2\theta_j)\times\sin(3\omega_j)]/192$$

の式でそれぞれ表される。

さらに、第1発明の好ましい態様によれば、前記光軸と結晶軸〔0 0 1〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された結晶光学素子G<sub>j</sub>において、前記所定の結晶軸は結晶軸〔1 1 0〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸であり、 $\omega_j = \phi_j - \rho_j$ としたとき、前記第1の評価量R<sub>j</sub>および前記第2の評価量S<sub>j</sub>は、

$$R_j = \alpha \times L_j \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} \times \{-84 - 12 \times \cos(4\omega_j)\} / 192$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times \{1 - \cos(2\theta_j)\} \times \{-48 + 48 \times \cos(4\omega_j)\} / 192$$

の式でそれぞれ表される。

また、第1発明の好ましい態様によれば、前記光軸と結晶軸〔0 1 1〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された結晶光学素子G<sub>j</sub>において、前記所定の結晶軸は結晶軸〔1 0 0〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸であり、 $\omega_j = \phi_j - \rho_j$ としたとき、前記第1の評価量R<sub>j</sub>および前記第2の評価量S<sub>j</sub>は、

$$R_j = \alpha \times L_j \times [\{1 - \cos(4\theta_j)\} \times \{21 - 9 \times \cos(4\omega_j) - 84 \times \cos(2\omega_j)\} + 96 \times \cos(2\omega_j)] / 192$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times [\{1 - \cos(2\theta_j)\} \times \{12 + 36 \times \cos(4\omega_j) + 48 \times \cos(2\omega_j)\} - 96 \times \cos(2\omega_j)] / 192$$

の式でそれぞれ表される。

さらに、第1発明の好ましい態様によれば、前記結晶の物性定数 $\alpha$ は、各結晶光学素子G<sub>j</sub>を形成する結晶中で結晶軸〔0 1 1〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向に進行する光のうち、結晶軸〔1 0 0〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向に偏光方向を有する光の屈折率 $n_{100}$ と、前記結晶軸〔0 - 1 1〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向に偏光方向を有する光の屈折率である光の屈折率 $n_{011}$ との差である。また、光の波長を $\lambda$ としたとき、前記第1の総和評価量 $\Sigma R_j$ と前記第2の総和評価量 $\Sigma S_j$ との差の絶対値が、前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結

像光束中の光線について $\lambda/2$ よりも小さく設定されていることが好ましい。

また、第1発明の好ましい態様によれば、光の波長を $\lambda$ としたとき、前記第1の総和評価量 $\Sigma R_j$ と所定の値との差の絶対値が、前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結像光束中の光線について $\lambda/2$ よりも小さく設定されている。また、光の波長を $\lambda$ としたとき、前記第2の総和評価量 $\Sigma S_j$ と所定の値との差の絶対値が、前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結像光束中の光線について $\lambda/2$ よりも小さく設定されていることが好ましい。

さらに、第1発明の好ましい態様によれば、前記光学系は、前記光軸と結晶軸 $[111]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $M$  ( $M$ は3以上の整数) 枚の結晶光学素子を含み、前記 $M$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[1-10]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(120/M)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有する。

また、第1発明の好ましい態様によれば、前記光学系は、前記光軸と結晶軸 $[001]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $N$  ( $N$ は3以上の整数) 枚の結晶光学素子を含み、前記 $N$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(90/N)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有する。

さらに、第1発明の好ましい態様によれば、前記光学系は、前記光軸と結晶軸 $[011]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $L$  ( $L$ は3以上の整数) 枚の結晶光学素子を含み、前記 $L$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(180/L)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有する。

また、第1発明の好ましい態様によれば、前記光学系は、前記光軸と結晶軸 $[011]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定

された $P$  ( $P$ は2以上の整数)枚の結晶光学素子を含み、前記 $P$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[1\ 0\ 0]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(90/P)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有する。

本発明の第2発明では、立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[1\ 1\ 1]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $M$  ( $M$ は3以上の整数)枚の結晶光学素子を含み、

前記 $M$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[1\ -1\ 0]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(120/M)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系を提供する。

本発明の第3発明では、立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[0\ 0\ 1]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とが互いにほぼ一致するように設定された $N$  ( $N$ は3以上の整数)枚の結晶光学素子を含み、

前記 $N$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[1\ 0\ 0]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(90/N)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系を提供する。

本発明の第4発明では、立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[0\ 1\ 1]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $L$  ( $L$ は3以上の整数)枚の結晶光学素子を含み、

前記 $L$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[1\ 0\ 0]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(180/L)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系を提



供する。

本発明では、第5発明として、立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記光軸と結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定されたP（Pは2以上の整数）枚の結晶光学素子を含み、

前記P枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸  $[1\ 0\ 0]$  または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ  $(90/P)$  度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系を提供することもできる。なお、第1発明～第5発明において、2枚または3枚以上の結晶光学素子は、各素子の回転誤差が $\pm 4$ 度以下、または光軸と一致すべき結晶軸と光軸との角度誤差が $\pm 4$ 度以下であることが好ましい。

第1発明～第5発明の好ましい態様によれば、前記結晶はフッ化カルシウム結晶またはフッ化バリウム結晶であることが好ましい。さらに、少なくとも1つの凹面反射鏡をさらに備えていることが好ましい。また、ArFエキシマレーザーの発振波長に対して最適に収差補正されているか、あるいはF<sub>2</sub>レーザーの発振波長に対して最適に収差補正されていることが好ましい。

本発明の第6発明では、マスクを照明するための照明系と、前記マスクに形成されたパターンの像を感光性基板上に形成するための第1発明～第5発明の光学系とを備えていることを特徴とする露光装置を提供する。

本発明の第7発明では、第6発明の露光装置を用いて前記マスクのパターンを前記感光性基板上に露光する露光工程と、前記露光工程により露光された前記感光性基板を現像する現像工程とを含むことを特徴とするマイクロデバイスの製造方法を提供する。

#### 図面の簡単な説明

第1図は、本発明の各実施形態にかかる投影光学系を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。

第2図は、本発明の第1実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図

である。

第 3 図は、蛍石のような立方晶系の結晶における結晶軸の名称などを説明する図である。

第 4 A 図～第 4 C 図は、結晶レンズの光軸を中心とした回転角度の定義を説明する図である。

第 5 図は、結晶レンズ G j 中の結像光線が Z 軸方向となす角度  $\theta$  および X 軸方向となす角度  $\phi$  の定義を説明する図である。

第 6 図は、本発明の第 2 実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。

第 7 図は、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法のフローチャートである。

第 8 図は、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得る際の手法のフローチャートである。

#### 発明を実施するための最良の形態

本発明の実施形態を、添付図面に基づいて説明する。

第 1 図は、本発明の各実施形態にかかる投影光学系を備えた露光装置の構成を概略的に示す図である。本発明の各実施形態では、露光装置に搭載される投影光学系に本発明を適用している。第 1 図を参照すると、各実施形態にかかる露光装置は、たとえば ArF エキシマレーザーや  $F_2$  レーザーのような光源 1 を備えている。光源 1 から供給された光束は、送光系 2 を経由して、照明光学系 3 に導かれる。照明光学系 3 は、図示した折り曲げミラー 3 a および 3 b や不図示のオプティカルインテグレータ（照度均一化素子）等からなり、レチクル（マスク）101 をほぼ均一な照度で照明する。

レチクル 101 は、たとえば真空吸着によりレチクルホルダー 4 に保持され、レチクルステージ 5 の作用によって移動可能に構成されている。レチクル 101 を透過した光束は、投影光学系 300 を介して集光され、半導体ウエハ 102 のような感光性基板上に、レチクル 101 上のパターンの投影像を形成する。ウエ

ハ 1 0 2 も、たとえば真空吸着によりウエハホルダー 7 に保持され、ウエハステージ 8 の作用によって移動可能に構成されている。こうして、ウエハ 1 0 2 をステップ移動させつつ一括露光を行うことにより、ウエハ 1 0 2 の各露光領域にレチクル 1 0 1 のパターン投影像を順次転写することができる。

また、投影光学系 3 0 0 に対してレチクル 1 0 1 およびウエハ 1 0 2 を相対移動させつつ走査露光（スキャン露光）を行うことにより、ウエハ 1 0 2 の各露光領域にレチクル 1 0 1 のパターン投影像を順次転写することも可能である。なお、実際の電子デバイスへの回路パターンの露光に際しては、前の工程で形成されたパターンの上に次の工程のパターンを正確に位置合わせして露光する必要があるので、露光装置にはウエハ 1 0 2 上の位置検出マークの位置を正確に検出するためのアライメント顕微鏡 1 0 が搭載されている。

光源 1 として  $F_2$  レーザーや Ar F エキシマレーザー（あるいは波長 1 2 6 nm の Ar<sub>2</sub> レーザーなど）を用いる場合、送光系 2、照明光学系 3 および投影光学系 3 0 0 の光路が、たとえば窒素のような不活性ガスでパージされている。特に、 $F_2$  レーザーを用いる場合には、レチクル 1 0 1、レチクルホルダー 4 およびレチクルステージ 5 がケーシング 6 によって外部の雰囲気と隔離され、このケーシング 6 の内部空間も不活性ガスでパージされている。同様に、ウエハ 1 0 2、ウエハホルダー 7 およびウエハステージ 8 がケーシング 9 によって外部の雰囲気と隔離され、このケーシング 9 の内部空間も不活性ガスでパージされている。

第 2 図は、本発明の第 1 実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。なお、第 2 図では、投影光学系 1 0 0（第 1 図の投影光学系 3 0 0 に対応）の光軸 AX 1 0 0 に平行に Z 軸を、Z 軸に垂直な面内において第 2 図の紙面に平行に X 軸を、Z 軸に垂直な面内において第 2 図の紙面に垂直に Y 軸をそれぞれ設定している。そして、+ Z 軸は図中下向きであり、+ X 軸は図中右向きであり、+ Y 軸は紙面手前向きであり、X Y Z 座標系は全体として右手座標系（以下、単に「右手系」という）を構成している。

第 1 実施形態では、波長が 1 9 3 nm の Ar F レーザーに対して収差補正が最適化された屈折型の投影光学系に本発明を適用している。第 1 実施形態の投影光

学系100では、レチクル101上の1点を射出した光束が、光軸AX100に沿って配置されたレンズ103～110を介して、感光性基板としての半導体ウエハ102上の1点に集光する。こうして、ウエハ102上には、レチクル101に描画されたパターンの投影像が形成される。

第1実施形態では、レンズ103～110のうち、レンズ105、106、109および110はフッ化カルシウム結晶（蛍石）で形成され、その他のレンズは合成石英ガラスで形成されている。以下、蛍石で形成されたレンズを「結晶レンズ」という。なお、瞳面PPは、レチクル101およびウエハ（感光性基板）102に対してほぼ光学的フーリエ変換面となっており、ここに開口絞りを配置することもできる。

前述したように、蛍石は、短波長の光束に対して複屈折性を有する。ただし、蛍石結晶の結晶軸[100]および[111]の方向に進む光については、複屈折性（直交する偏光面を有する2つの光束間の屈折率差）は生じない。したがって、結晶レンズ（結晶光学素子）の結晶軸[111]または[100]と投影光学系100の光軸AX100（ひいては結晶レンズの光軸）とが一致するように設定すれば、光軸AX100と平行に進む結像光に対して複屈折は生じないことになる。逆に、結晶軸[011]に沿って進む結像光に対しては、複屈折量が最大となる。

ところで、投影光学系100の解像度を向上させるには、ウエハ上102への光束の最大入射角 $\theta_{100}$ （第2図参照）の正弦である像側NA（像側開口数）を拡大する必要がある。ちなみに、レチクル101上の1点を発してウエハ102上に集光する結像光束は、ウエハ102への最大入射角 $\theta_{100}$ によって規定される結像光束の範囲（第2図において結像光束100Lから100Rまでの範囲）で広がって、投影光学系100を構成するレンズ103～110を通ることになる。

したがって、結像光束（100L～100R）中の任意の結像光線100mについては、その進行方向をすべて光軸AX100と平行に設定することは不可能である。事実、任意の結像光線100mについて、結晶レンズ105内の光路1

05m、結晶レンズ106内の光路106m、結晶レンズ109内の光路109m、および結晶レンズ110内の光路110mは、光軸AX100と平行ではない。その結果、結像光線100mについては、蛍石結晶の複屈折に起因する光路長変動（光路長変化）を受けることになる。

結像光束（100L～100R）内の他の結像光線についても、結晶レンズ105、106、109、110を透過する際に、蛍石結晶の複屈折に起因する光路長変動を受ける。この場合、他の結像光線については、各結晶レンズ中の光路長や光軸AX100となす角が一般には結像光線100mの場合と異なるので、結像光線100mの場合とは異なる光路長変動を受けることになる。このように、結像光束（100Lから100R）内の各結像光線についてそれぞれ異なる光路長変動を受けることは、すなわち結像光束に波面収差が生じることであり、投影光学系100の解像性能を低下させることにつながる。

このような複屈折量は、露光波長 $\lambda$ と、蛍石の結晶方向と光束の進行方向との関係と、光束の偏光方向とに基づいて正確に求まる。しかしながら、それは、蛍石の結晶方向と光束の進行方向とから定まる2階のテンソルと、そのテンソルを3次元空間内で回転するための多数の回転行列とを併用して初めて得られるものであり、光学設計の指標として使用するには極めて複雑な計算方法であった。本件発明者は、以下に述べる簡便な式によって上記の複屈折量を表記することができるとを見出した。そして、この式を満たすように光学設計を行うことにより、結晶レンズを使用しても複屈折の悪影響が実質的に生じない光学系の設計が可能であることを見出した。

上記複屈折量を算出する式は、結晶レンズのどの結晶軸を光学系の光軸（以下、「Z軸」とも称する）にほぼ一致させるかによって異なるものとなる。そこで、第3図を参照して、蛍石のような立方晶系の結晶における結晶軸の名称などを説明する。立方晶系とは、立方体の単位胞がその立方体の各辺の方向に周期的に配列した結晶構造である。立方体の各辺は、相互に直交しており、これをXa軸、Ya軸、Za軸とする。このとき、Xa軸の+方向が結晶軸[100]の方向であり、Ya軸の+方向が結晶軸[010]の方向であり、Za軸の+方向が結晶

軸  $[001]$  の方向である。

より一般的には、上記の  $(Xa, Ya, Za)$  右手座標系において方位ベクトル  $(x1, y1, z1)$  をとるとき、その向きが結晶軸  $[x1, y1, z1]$  の方向となる。たとえば、結晶軸  $[111]$  の向きは、方位ベクトル  $(1, 1, 1)$  の向きと一致する。また、結晶軸  $[11-2]$  の向きは、方位ベクトル  $(1, 1, -2)$  の向きと一致する。もちろん、立方晶系の結晶において、 $Xa$  軸と  $Ya$  軸と  $Za$  軸とは、光学的にも機械的にも互いに全く等価であり、実際の結晶において何ら区別をつけることはできない。また、結晶軸  $[011]$ ,  $[0-11]$ ,  $[110]$  等のように3個の数字の並びおよびその符号を変えた各結晶軸も、光学的にも機械的にも全く等価（同等）である。

本発明では、相対的な結晶軸方位を厳密に定義する必要がある場合には、たとえば結晶軸  $[011]$  と光学的に等価な複数の結晶軸を、 $[011]$ ,  $[0-11]$ ,  $[110]$  などのように、符号や配列位置を変えて表記（列記）する。しかしながら、相対的な結晶軸方位を厳密に定義する必要がない場合には、結晶軸  $[011]$  の表記をもって、 $[011]$ ,  $[0-11]$ ,  $[110]$  の様な複数の光学的に等価な結晶軸を一括的に表わすものとする。これは、結晶軸  $[001]$  や  $[111]$  等のように結晶軸  $[011]$  以外の他の結晶軸についても同様である。

高解像度が要求される光学系の場合、結晶レンズにおいて、結晶軸  $[001]$ 、結晶軸  $[011]$ 、または結晶軸  $[111]$  が光軸（ $Z$  軸）とほぼ一致するように設定するのがよい。これは、これらの結晶軸を光軸と一致させることにより、複屈折の光軸に対する回転対称性を最良に設定することができるからである。なお、結晶軸  $[001]$  を  $Z$  軸と一致させる場合には、 $Z$  軸に垂直な面（ $XY$  平面）内には、結晶軸  $[100]$ ,  $[010]$ ,  $[110]$ ,  $[-110]$  等が存在することになる。また、結晶軸  $[011]$  を  $Z$  軸と一致させる場合には、 $XY$  平面内に結晶軸  $[100]$ ,  $[-100]$ ,  $[01-1]$  などが存在する。さらに、結晶軸  $[111]$  を  $Z$  軸と一致させる場合には、 $XY$  平面内に結晶軸  $[1-10]$ ,  $[11-2]$  などが存在する。

したがって、上述の3つの結晶軸  $[001]$ ,  $[011]$ ,  $[111]$  のうち、ど

の結晶軸を光軸（Z軸）に一致させても、その結晶レンズを光軸中心に何度回転させるかという回転角度の自由度が残存し、その回転角度に伴って複屈折の影響も変わることになる。第1実施形態では、結晶レンズ105および106において、結晶軸 $[001]$ を投影光学系100の光軸AX100に一致させている。また、結晶レンズ109および110では、結晶軸 $[111]$ を投影光学系100の光軸AX100に一致させている。

第4A図～第4C図は、結晶レンズの光軸を中心とした回転角度の定義を説明する図である。なお、第4A図～第4C図において、+Z軸は紙面手前向きであり、投影光学系100の光軸AX100と一致している。第4A図に示すように、結晶軸 $[001]$ が光軸（Z軸）と一致している結晶レンズG<sub>j</sub>（結晶レンズ105および106のうちの1つのレンズ）については、そのXY平面内の結晶軸 $[100]$ のZ軸を回転中心としたX軸方向からY軸方向への回転量（回転角度）を $\rho_j$ と定めることにする。

また、第4B図に示すように、結晶軸 $[111]$ が光軸（Z軸）と一致している結晶レンズG<sub>j</sub>（結晶レンズ109および110のうちの1つのレンズ）では、そのXY平面内の結晶軸 $[1-10]$ のZ軸を回転中心としたX軸方向からY軸方向への回転量を $\rho_j$ と定めることにする。さらに、本実施形態では使用していないが、結晶軸 $[011]$ が光軸（Z軸）と一致している結晶レンズG<sub>j</sub>については、第4C図に示すように、そのXY平面内の結晶軸 $[100]$ のZ軸を回転中心としたX軸方向からY軸方向への回転量を $\rho_j$ と定めることにする。

第5図は、結晶レンズG<sub>j</sub>中の結像光線がZ軸方向となす角度 $\theta$ およびX軸方向となす角度 $\phi$ の定義を説明する図である。すなわち、第5図は、結晶レンズG<sub>j</sub>（結晶レンズ105、106、109、110）中の結像光路（105m、106m、109m、110m）がZ軸方向となす角度 $\theta$ およびX軸方向となす角度 $\phi$ を示している。第5図中のベクトルL<sub>j</sub>mは、各結晶レンズG<sub>j</sub>中の結像光路（105m、106m、109m、110m）に平行な方向ベクトルであり、その始点をZ'軸上の点Iに一致させている。なお、Z'軸は、光軸であるZ軸をベクトルL<sub>j</sub>mの始点Iの位置まで平行シフトした軸であり、その方向は当然

ながらZ軸の方向に等しい。

このとき、ベクトル $L_j m$ と $Z'$ 軸とのなす角度を $\theta$ と定義する。 $j$ 番目の結晶レンズ $G_j$ について、この角度は $\theta_j$ である。また、ベクトル $L_j m$ の終点 $P$ が $Z'$ 軸上に投影される位置を原点 $O$ とし、原点 $O$ から終点 $P$ へ延びる線分と $X'$ 軸とがなす角度を $\phi$ と定義する。この場合も、 $j$ 番目の結晶レンズ $G_j$ について、この角度は $\phi_j$ である。ここで、 $X'$ 軸も $X$ 軸を平行シフトしたものであり、その方向は当然ながら $X$ 軸の方向に等しい。その結果、 $Y'$ 軸も $Y$ 軸を平行シフトしたものであり、その方向は当然ながら $Y$ 軸の方向に等しい。

以下、光束の進行方向を表わすベクトル $L_j m$ と $Z'$ 軸とを含む平面内に電場面がある偏光を「R偏光」と呼び、ベクトル $L_j m$ を含み且つR偏光面と直交する平面内に電場面がある偏光を「 $\theta$ 偏光」と呼ぶものとする。より広義には、R偏光は、偏光方向が光軸 $AX100$ を中心とする円の径方向と概ね一致している偏光を表わしている。また、 $\theta$ 偏光は、偏光方向が光軸 $AX100$ を中心とする円の周方向と概ね一致している偏光を表わしている。

以上のような前提に基づいて、前述の複屈折量を算出する式について、改めて説明する。 $j$ 番目の結晶レンズ $G_j$ 内の光束に関する複屈折量の影響を表わす評価量は、R偏光の屈折率変動量を表わす評価量 $R_j$ （第1の評価量）と、 $\theta$ 偏光の屈折率変動量を表わす評価量 $S_j$ （第2の評価量）とである。これら2つの評価量 $R_j$ および $S_j$ が、結晶レンズ $G_j$ を形成する結晶の物性定数 $\alpha$ と、結晶レンズ $G_j$ 中の各光束の光路長 $L_j$ と、上述した3つの角度 $\theta_j$ 、 $\phi_j$ 、 $\rho_j$ と、角度パラメータ $\omega_j$ （ $=\phi_j - \rho_j$ ）とを用いて、以下のように簡便な式で表されることが、本件発明者の解析によって初めて明らかになった。

すなわち、光軸と結晶軸 $[111]$ とが一致するように設定された結晶レンズ（結晶光学素子） $G_j$ において、第1の評価量 $R_j$ および第2の評価量 $S_j$ は、次の式（1）および（2）でそれぞれ表される。

$$R_j = \alpha \times L_j \times [56 \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} - 32\sqrt{2} \times \sin(4\theta_j) \times \sin(3\omega_j)] / 192 \quad (1)$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times [32 \times \{1 - \cos(2\theta_j)\}]$$



$$+64\sqrt{2}\times\sin(2\theta_j)\times\sin(3\omega_j)]/192 \quad (2)$$

また、光軸と結晶軸  $[0\ 0\ 1]$  とが一致するように設定された結晶レンズ  $G_j$  において、第1の評価量  $R_j$  および第2の評価量  $S_j$  は、次の式 (3) および (4) でそれぞれ表される。

$$R_j = \alpha \times L_j \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} \times \{-84 - 12 \times \cos(4\omega_j)\} / 192 \quad (3)$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times \{1 - \cos(2\theta_j)\} \times \{-48 + 48 \times \cos(4\omega_j)\} / 192 \quad (4)$$

さらに、光軸と結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  とが一致するように設定された結晶レンズ  $G_j$  において、第1の評価量  $R_j$  および第2の評価量  $S_j$  は、次の式 (5) および (6) でそれぞれ表される。

$$R_j = \alpha \times L_j \times [\{1 - \cos(4\theta_j)\} \times \{21 - 9 \times \cos(4\omega_j) - 84 \times \cos(2\omega_j)\} + 96 \times \cos(2\omega_j)] / 192 \quad (5)$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times [\{1 - \cos(2\theta_j)\} \times \{12 + 36 \times \cos(4\omega_j) + 48 \times \cos(2\omega_j)\} - 96 \times \cos(2\omega_j)] / 192 \quad (6)$$

結晶の物性定数  $\alpha$  は、結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  の方向に進行する光に対して生じる複屈折を表わし、結晶軸  $[1\ 0\ 0]$  の方向に偏光方向（電場方向）を有する光の屈折率  $n_{100}$  と、結晶軸  $[0\ -1\ 1]$  の方向に偏光方向を有する光の屈折率  $n_{011}$  との差である。物性定数  $\alpha$  は、結晶が蛍石であれば、波長が  $193\text{ nm}$  の ArF レーザー光に対しては  $3.6 \times 10^{-7}$  程度であり、波長が  $157\text{ nm}$  の  $F_2$  レーザー光に対しては  $6.5 \times 10^{-7}$  程度である。光路長  $L_j$  は、結晶レンズ  $G_j$  中での結像光路の長さ（光路  $105\text{ m}$  などの長さ）である。また、それ以降の  $\cos$  や  $\sin$  を含む項は無次元量であるため、評価量  $R_j$  および  $S_j$  は複屈折による透過光の光路長変化（光路長情報）を表わしている。

こうして、レチクル  $101$  上の1点からウエハ  $102$  上の1点に至る結像光線  $100\text{ m}$  上には、複数の（本実施形態では4枚の）結晶レンズ  $G_j$  が存在するので、評価量  $R_j$  および  $S_j$  を複数の結晶レンズ  $G_j$  のそれぞれについて求める。そして、第1の評価量  $R_j$  の総和である第1の総和評価量  $\Sigma R_j$ （ $\Sigma$  は異なる  $j$  についての積算を表わす積算記号である）および第2の評価量  $S_j$  の総和である第2の総和評価量  $\Sigma S_j$  を求める。総和評価量  $\Sigma R_j$  および  $\Sigma S_j$  は、結像光線

100mに対する投影光学系100全体としての複屈折の影響（複屈折による透過光の光路長変化）を表わす指標となる。すなわち、総和評価量 $\Sigma R_j$ の値と総和評価量 $\Sigma S_j$ の値とが等しければ、R偏光と $\theta$ 偏光との光路長変化は等しく、従って波面も一致していることになる。

より具体的には、結晶レンズ105, 106については結晶軸[001]が光軸AX100と一致しているので、結像光路105m, 106mについて、その光路長 $L_j$ と上記角度 $\theta_j$ ,  $\phi_j$ とを求め、それらを式(3)および(4)に代入することにより、各結晶レンズ105, 106の評価量 $R_j$ および $S_j$ をそれぞれ求める。また、結晶レンズ109, 110については結晶軸[111]が光軸AX100と一致しているので、結像光路109m, 110mについて、その光路長 $L_j$ と上記角度 $\theta_j$ ,  $\phi_j$ とを求め、それらを式(1)および(2)に代入することにより、各結晶レンズ109, 110の評価量 $R_j$ および $S_j$ をそれぞれ求める。そして、すべての結晶レンズ105, 106, 109, 110についての評価量 $R_j$ および $S_j$ の総和である総和評価量 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ を求める。

レチクル101上の1点からウエハ102上の1点に至る結像光束(100L~100R)内での波面収差、すなわち各結像光線間の光路長差を求めるには、各結像光線（瞳面PP上で異なる位置を通る結像光線）についてそれぞれ $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ を求める必要がある。そして、 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ がすべての結像光線についてそれぞれ一定であり、且つ $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とがすべての結像光線について互いに等しければ、結像光束(100L~100R)には波面収差が無いことになる。

そして、 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ がすべての結像光線についてそれぞれ一定であり且つ $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とがすべての結像光線について互いに等しいというこの関係を満たすように、投影光学系100の設計を最適化することにより、すなわち各レンズの厚さ、曲率半径、間隔などを最適化し、結晶レンズの光軸を中心とした回転角度を最適化することにより、複屈折による波面収差の無い光学系を実現することができる。なお、 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ をすべての結像光線についてそれぞ

れ完全に一定にし、且つ $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とをすべての結像光線について互いに完全に等しくすることは困難である。

実際には、 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ のばらつきの範囲を露光波長 $\lambda$ の $1/2$ 以下程度に抑え込むことにより、実用上は複屈折の悪影響を受けない光学系を実現することができる。換言すると、 $\Sigma R_j$ と所定値との差の絶対値および $\Sigma S_j$ と所定値との差の絶対値を、像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結像光束中の光線について $\lambda/2$ よりも小さく抑えるとともに、 $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ との差の絶対値を、像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結像光束中の光線について $\lambda/2$ よりも小さく抑えることにより、複屈折の悪影響を実質的に受けない光学系を実現することができる。

ただし、この基準値 $\lambda/2$ は、 $k_1$ ファクター $=0.35$ 程度の微細度のパターン（線幅 $=k_1 \times \lambda / NA$ ）を想定した場合に、結像特性に大きな影響を与えないための許容値であり、露光するパターンサイズがより小さい場合にはさらに厳しい基準が必要である。例えば、位相シフトレチクルを使用して、 $k_1$ ファクター $=0.2$ 程度の微細度のパターンを露光する場合には、 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ のばらつきの範囲をすべての結像光線について露光波長 $\lambda$ の $1/20$ 以下程度に抑え込まないと、良好な結像特性を得ることが難しくなる。

ところで、実際には、結像光束内の全面（瞳面 $PP$ の全面）に亘って、上記の様な $R$ 偏光および $\theta$ 偏光を実現することは難しい。ただし、結像光束の一部分（瞳面 $PP$ の一部分）毎に分割して考えると、このような $R$ 偏光および $\theta$ 偏光は、現実的な $X$ 偏光および $Y$ 偏光に対して、回転行列を変換関係として結ばれる偏光である。したがって、 $R$ 偏光および $\theta$ 偏光を想定し、この偏光状態において波面収差の無い光学系は、その偏光状態と回転行列の関係で結ばれる現実的な $X$ 偏光および $Y$ 偏光の光束に対しても波面収差の無い光学系であり、上記のように $R$ 偏光および $\theta$ 偏光に基づいた評価指標を用いることに特に問題は無い。

ところで、上述の式（１）～（６）において $\omega_j (= \phi_j - \rho_j)$ を含む項すなわち $\phi_j$ を含む項の存在は、光束と $X$ 軸方向とがなす角度 $\phi_j$ によって複屈折の影響が変動することを意味している。つまり、これらの項の値は、角度パラメ

一タ $\omega_j$ 中の角度 $\rho_j$ 、すなわち所定の軸方向に対する結晶レンズ $G_j$ の回転角度を変更することにより、変動させることが可能である。

結晶軸 $[111]$ を光軸とする結晶レンズでは、 $R_j$ および $S_j$ は、 $\sin(3\omega_j)$ に比例する項を持つので、レンズの回転に対して3回回転対称な値を持つ。これは、 $R_j$ および $S_j$ で与えられる光路長変化量が、レンズ回転の $120$ 度を周期として変動することを意味している。したがって、結晶軸 $[111]$ を光軸とするレンズを2枚使用するなら、一方のレンズに対して他方のレンズが光軸を中心として $60$ 度または $180$ 度( $=60+120$ )だけ相対回転し、 $XY$ 面内で双方の結晶軸 $[1-10]$ が $60$ 度または $180$ 度だけ角度的に離れるように設定すると、両レンズの3回回転対称成分が相殺され、各結像光束について $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とを等しくするのに好都合であることが判る。

同様に、結晶軸 $[001]$ を光軸とする結晶レンズでは、 $R_j$ および $S_j$ は、 $\cos(4\omega_j)$ に比例する項を持つので、レンズの回転に対して4回回転対称な値を持つ。この場合、 $R_j$ および $S_j$ は、レンズ回転の $90$ 度を周期として変動する。したがって、結晶軸 $[001]$ を光軸とするレンズを2枚使用するなら、一方のレンズに対して他方のレンズが光軸を中心として $45$ 度または $135$ 度( $=45+90$ )だけ相対回転し、 $XY$ 面内で双方の結晶軸 $[100]$ が $45$ 度または $135$ 度だけ角度的に離れるように設定すると、両レンズの4回回転対称成分が相殺され、各結像光束について $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とを等しくするのに好都合である。

さらに、結晶軸 $[011]$ を光軸とする結晶レンズでは、 $R_j$ および $S_j$ は、 $\cos(4\omega_j)$ に比例する項および $\cos(2\omega_j)$ に比例する項の両方を持つ。この場合、結晶軸 $[011]$ を光軸とするレンズを4枚使用し、各レンズが光軸を中心として $45$ 度ずつ相対回転し、 $XY$ 面内でそれぞれの結晶軸 $[100]$ が $45$ 度ずつ離れるように設定すると、各レンズの回転非対称が相殺され、各結像光束について $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とを等しくするのに好都合である。

勿論、上記の2枚のレンズペアによる回転対称成分相殺や、4枚のレンズペアによる回転非対称の相殺は、2枚のレンズや4枚のレンズへの適用に限られるわ

けではない。したがって、複数の結晶レンズの光軸を中心とした回転角度、厚さ、曲率半径、間隔等や、他のレンズの厚さ、曲率半径、間隔等を調整しつつ、全体として  $\Sigma R_j$  と  $\Sigma S_j$  とが等しくなるように設定すれば良いことは言うまでもない。

たとえば、結晶軸  $[111]$  を光軸とする厚さのほぼ等しい3枚のレンズを用いて、複屈折の回転非対称な成分を相殺することもできる。この場合、1枚のレンズでの回転非対称の周期は、前述したように120度である。したがって、3枚のレンズが光軸を中心として互いに40度ずつ離れた回転位置関係を有するように、すなわち光軸に垂直な面内にある結晶軸  $[1-10]$  の方向が光軸を中心として互いに40度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定することにより、3枚のレンズの回転非対称性がそれぞれ1/3周期ずつ位置ずれして重なり合うことになる。

このとき、3枚のレンズにおいて、第1のレンズの結晶軸  $[1-10]$  の方向に対して第2のレンズの結晶軸  $[1-10]$  の方向が光軸を中心として所定の向きに40度だけ回転した位置関係を有し、第3のレンズの結晶軸  $[1-10]$  の方向が第2のレンズの結晶軸  $[1-10]$  の方向に対して光軸を中心として同じ所定の向きに40度だけ回転した位置関係を有する。換言すると、各レンズの結晶軸  $[1-10]$  の回転角度は、3枚のレンズ中の1つのレンズを基準(=0度)とすると、0度、40度、80度となる。

3枚の各レンズの屈折力が弱く且つ各レンズ中での光束の進行方向がほぼ一定である場合には、上述の式(1)および(2)における  $\sin(3\omega_j)$  は、3枚のレンズに対して次の式(21)、(22)、(23)でそれぞれ表わされる。ここで、 $\sin$  の引数の単位は[度]である。

$$\sin(3\omega_1) \quad (21)$$

$$\sin\{3(\omega_1+40)\}=\sin(3\omega_1+120) \quad (22)$$

$$\sin\{3(\omega_1+80)\}=\sin(3\omega_1+240) \quad (23)$$

さらに、式(22)および(23)を、次の式(22')および(23')に示すように変形することができる。

$$\sin(3\omega_1) \times \cos(120) + \cos(3\omega_1) \times \sin(120) \quad (22')$$

$$\sin(3\omega_1) \times \cos(240) + \cos(3\omega_1) \times \sin(240) \quad (23')$$

したがって、式(21)と(22)と(23)との総和は、次の式(24)で表される。

$$\{1 + \cos(120) + \cos(240)\} \times \sin(3\omega_1) + \{\sin(120) + \sin(240)\} \times \cos(3\omega_1) \quad (24)$$

式(24)において、 $1 + \cos(120) + \cos(240)$ および $\sin(120) + \sin(240)$ は、ともに0である。したがって、式(21)と(22)と(23)との総和すなわち式(24)の値は0になる。換言すれば、結晶軸[111]を光軸とする3枚のレンズが光軸を中心として互いに40度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定することにより、その相殺作用によって複屈折の回転非対称成分を除去することができる。そして、このような3枚のレンズの組を用いても、各結像光束について $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とを等しくするのに好都合であることが判る。

同様に、結晶軸[001]を光軸とする厚さのほぼ等しい3枚のレンズを用いて、複屈折の回転非対称な成分を相殺することもできる。この場合、1枚のレンズでの回転非対称の周期は、前述したように90度である。したがって、3枚のレンズが光軸を中心として互いに30度ずつ離れた回転位置関係を有するように、すなわち光軸に垂直な面内にある結晶軸[100]の方向が光軸を中心として互いに30度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定することにより、3枚のレンズの回転非対称性がそれぞれ1/3周期ずつ位置ずれして重なり合うことになる。

上述の式(3)および(4)における $\cos(4\omega_j)$ は、3枚のレンズに対して次の式(31)、(32)、(33)でそれぞれ表わされる。ここで、 $\cos$ の引数の単位は[度]である。

$$\cos(4\omega_1) \quad (31)$$

$$\cos\{4(\omega_1 + 30)\} = \cos(4\omega_1 + 120) \quad (32)$$

$$\cos\{4(\omega_1 + 60)\} = \cos(4\omega_1 + 240) \quad (33)$$

さらに、式(32)および(33)を、次の式(32')および(33')に示すように変形することができる。

$$\cos(4\omega l) \times \cos(120) - \sin(4\omega l) \times \sin(120) \quad (32')$$

$$\cos(4\omega l) \times \cos(240) - \sin(4\omega l) \times \sin(240) \quad (33')$$

したがって、式(31)と(32)と(33)との総和は、次の式(34)で表される。

$$\{1 + \cos(120) + \cos(240)\} \times \cos(4\omega l) - \{\sin(120) + \sin(240)\} \times \cos(4\omega l) \quad (34)$$

式(34)において、 $1 + \cos(120) + \cos(240)$ および $\sin(120) + \sin(240)$ は、ともに0である。したがって、式(31)と(32)と(33)との総和すなわち式(34)の値は0になる。換言すれば、結晶軸[001]を光軸とする3枚のレンズが光軸を中心として互いに30度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定することにより、その相殺作用によって複屈折の回転非対称成分を除去することができる。そして、このような3枚のレンズの組を用いても、各結像光束について $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とを等しくするのに好都合であることが判る。

なお、結晶軸[111]を光軸とするレンズおよび結晶軸[001]を光軸とするレンズについて回転非対称な複屈折の低減を行う方法は、上述の2枚のレンズまたは3枚のレンズの相互回転による回転非対称成分の相殺に限定されない。例えば上記の方法をさらに発展させると、結晶レンズが周期 $\beta$ 度の回転非対称性を有する場合、光軸を中心として互いに $(\beta/Q)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有する $Q$ 枚( $Q$ は2以上の任意の整数)の結晶レンズを使用することにより、その相殺作用によって複屈折の回転非対称成分を除去することができる。

換言すれば、結晶軸[111]を光軸とする $M$ 枚( $M$ は3以上の任意の整数)の結晶レンズを用いる場合、 $M$ 枚のレンズが光軸を中心として互いに $(120/M)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定することにより、その相殺作用によって複屈折の回転非対称成分を除去することができる。具体的には、たとえば結晶軸[111]を光軸とする5枚の結晶レンズを用いる場合、5枚のレンズが光軸を中心として互いに24 $(=120/5)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定することにより、複屈折の回転非対称成分を相殺することができる。

また、結晶軸[001]を光軸とする $N$ 枚( $N$ は3以上の任意の整数)の結晶

レンズを用いる場合、N枚のレンズが光軸を中心として互いに $(90/N)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定することにより、その相殺作用によって複屈折の回転非対称成分を除去することができる。具体的には、たとえば結晶軸 $[001]$ を光軸とする6枚の結晶レンズを用いる場合、6枚のレンズが光軸を中心として互いに $15 (= 90/6)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定することにより、複屈折の回転非対称成分を相殺することができる。

なお、各結晶レンズの回転角が上記各値 $(120/M, 90/N)$ に回転非対称の周期 $\beta$ を加えたものであってもよいことは、上述の実施形態と同様である。一般に、複屈折の回転非対称成分を相殺するためのレンズの枚数が2枚であってもよいが、以上の方法では3枚以上の任意の枚数のレンズを用いて複屈折の回転非対称成分を相殺することができるので、レンズの枚数が2枚の場合に比してレンズ設計に与える制約が少なくなり好都合である。つまり、各結像光束について $\Sigma R_j$ と $\Sigma S_j$ とを等しくするのに、このような多数枚の結晶レンズからなるレンズ群を使用することもできる。なお、上述のように、各レンズの屈折力が弱く且つ各レンズ中での光束の進行方向がほぼ一定である場合に上記相殺効果が最も効果的に得られるが、それ以外の場合にも上記相殺効果が得られることは言うまでもない。

ところで、結晶軸 $[011]$ を光軸とするレンズの場合、上述の式(5)および(6)に示すように、回転非対称な項として、 $\cos(4\omega_j)$ に比例する項および $\cos(2\omega_j)$ に比例する項が存在する。この2つの項のうち、 $\cos(2\omega_j)$ に比例する項は、 $180$ 度の回転周期を有する成分である。そこで、前述の通り、結晶軸 $[011]$ を光軸とするほぼ等しい厚さの2枚のレンズを光軸中心に相互に $90$ 度回転させて配置すること( $90$ 度回転2枚レンズ群)により、回転非対称成分を相殺することが可能である。さらに、上記と同様の考察から、結晶軸 $[011]$ を光軸とするほぼ等しい厚さの3枚のレンズを用いて、複屈折の回転非対称な成分を相殺することもできる。この場合、3枚のレンズが光軸を中心として互いに $60$ 度ずつ離れた回転位置関係を有するように、すなわち光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ の方向が光軸を中心として互いに $60$ 度ずつ離れた回転



位置関係を有するように設定すること（60度回転3枚レンズ群）により、複屈折の回転非対称成分を相殺することが可能である。

さらに一般的には、 $\cos(2\omega j)$  に比例する回転非対称項を除去するには、結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  を光軸とする  $L$  枚（ $L$  は3以上の任意の整数）の結晶レンズを用いて、 $L$  枚のレンズが光軸を中心として互いに  $(180/L)$  度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定すればよい。この方法によれば、結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  を光軸とするレンズにおいて、 $\cos(2\omega j)$  に比例する回転非対称項を相殺するためのレンズ枚数を任意の値に選定することができるため、レンズ設計に与える制約が少なくなり好都合である。

また、 $\cos(4\omega j)$  に比例する回転非対称項は、結晶軸  $[0\ 0\ 1]$  を光軸とするレンズと同様に、光軸を中心として相互に45度回転させた2枚のレンズを用いることにより相殺することが可能である。さらに、上記と同様の考察から、結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  を光軸とするほぼ等しい厚さの3枚のレンズを用いて、複屈折の回転非対称な成分を相殺することもできる。この場合、3枚のレンズが光軸を中心として互いに30度ずつ離れた回転位置関係を有するように、すなわち光軸に垂直な面内にある結晶軸  $[1\ 0\ 0]$  の方向が光軸を中心として互いに30度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定すること（30度回転3枚レンズ群）により、複屈折の回転非対称成分を相殺することが可能である。

さらに一般的には、 $\cos(4\omega j)$  に比例する回転非対称項を除去するには、結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  を光軸とする  $P$  枚（ $P$  は2以上の任意の整数）の結晶レンズを用いて、 $P$  枚のレンズが光軸を中心として互いに  $(90/P)$  度ずつ離れた回転位置関係を有するように設定すればよい。この方法によれば、結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  を光軸とするレンズにおいて、 $\cos(4\omega j)$  に比例する回転非対称項を相殺するためのレンズ枚数を任意の値に選定することができるため、レンズ設計に与える制約が少なくなり好都合である。

なお、結晶軸  $[0\ 1\ 1]$  を光軸とするレンズの場合、実際には、 $\cos(2\omega j)$  に比例する回転非対称成分を相殺するために、光軸に沿って近接配置された上記  $L$  枚のレンズまたは2枚のレンズからなるレンズ群を少なくとも  $P$  組用意する。そ

して、各レンズ群の間に光軸を中心として（ $90/P$ ）度の相対回転を付与することにより  $\cos(4\omega_j)$  に比例する項を除去することが望ましい。この方法においても、 $\cos(4\omega_j)$  に比例する回転非対称項を相殺するためのレンズ群の数が2群に限定されることなく、3群以上のレンズ群を使用することができるので、レンズ設計上の制約が少なくなり好都合である。なお、本実施形態では、複屈折の回転非対称成分を相殺するためのレンズの枚数が2枚であってもよいが、以上の方法では3枚以上の任意の枚数のレンズを用いて複屈折の回転非対称成分を相殺することができるので、レンズの枚数が2枚の場合に比してレンズ設計に与える制約が少なくなり好ましい。

以上のように、複数枚のレンズの光軸を中心とした回転によって複屈折の影響を解消するには、上記複数枚の各レンズの回転方向を上記所定の角度に対して $\pm 4$ 度程度以内に抑えることが望ましい。回転角度の設定誤差がこの許容値よりも大きくなると、本発明による複屈折の解消効果が減少し、ひいては残存複屈折により結像性能が悪化してしまうため問題がある。また、光軸とほぼ一致すべき指定の結晶軸の光軸との方向誤差についても、 $\pm 4$ 度程度以内に抑えることが望ましい。指定の結晶軸と光軸との角度の設定誤差がこの許容値よりも大きくなると、上述の場合と同様に、残存複屈折により結像性能が悪化してしまうため問題がある。

これは、3枚以上のレンズからなるレンズ群を使用して複屈折を解消する場合にも、2枚のレンズからなるレンズ群を使用して複屈折を解消する場合にも同様である。ただし、この $\pm 4$ 度以内の角度誤差範囲は、前述の基準と同様に、 $k_1$ ファクター $=0.35$ 程度の微細度のパターン（線幅 $=k_1 \times \lambda / NA$ ）を想定した場合の許容角度誤差範囲であり、これよりも微細なパターンを転写する必要がある光学系では、上記指定の結晶軸と光軸との方向誤差を上記の角度誤差範囲よりも小さくする必要がある。例えば、位相シフトレチクルを使用して、 $k_1$ ファクター $=0.2$ 程度の微細度のパターンを露光する場合には、これらの角度誤差を共に $\pm 2$ 度以下とすることが望ましい。

逆に、 $k_1$ ファクター $=0.5$ 程度のパターンを対象とする光学系であれば、

これらの角度誤差を共に±6度程度に緩和しても、実用上、十分な結像性能を得ることが可能である。なお、このように、結晶軸の方向を厳密に管理するためには、結晶レンズの材料である結晶材料の製造工程や、結晶レンズの加工（研削・研磨等）工程において、結晶の格子定数に近い波長を有するX線を結晶に対して照射し、その回折パターンを計測して結晶軸方向を確認する手段、すなわち結晶軸方向確認手段を講じることが好ましい。

なお、上述のように、同じ結晶軸を光軸とするレンズ群を光軸中心に相対回転させて、それらの回転非対称成分を相殺除去していくと、相殺が完全に達成された場合には、式（1）～（6）中の $\omega_j$ を含まない項だけが $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ に影響することになる。

光軸と結晶軸 $[111]$ とが一致するように設定された結晶レンズ $G_j$ において、 $\omega_j$ を含まない項だけが影響する場合、第1の評価量 $R_j'$ および第2の評価量 $S_j'$ は、次の式（7）および（8）でそれぞれ表される。

$$R_j' = \alpha \times L_j \times 56 \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} / 192 \quad (7)$$

$$S_j' = \alpha \times L_j \times 32 \times \{1 - \cos(2\theta_j)\} / 192 \quad (8)$$

また、光軸と結晶軸 $[001]$ とが一致するように設定された結晶レンズ $G_j$ において、 $\omega_j$ を含まない項だけが影響する場合、第1の評価量 $R_j'$ および第2の評価量 $S_j'$ は、次の式（9）および（10）でそれぞれ表される。

$$R_j' = \alpha \times L_j \times -84 \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} / 192 \quad (9)$$

$$S_j' = \alpha \times L_j \times -48 \times \{1 - \cos(2\theta_j)\} / 192 \quad (10)$$

さらに、光軸と結晶軸 $[011]$ とが一致するように設定された結晶レンズ $G_j$ において、 $\omega_j$ を含まない項だけが影響する場合、第1の評価量 $R_j'$ および第2の評価量 $S_j'$ は、次の式（11）および（12）でそれぞれ表される。

$$R_j' = \alpha \times L_j \times 21 \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} / 192 \quad (11)$$

$$S_j' = \alpha \times L_j \times 12 \times \{1 - \cos(2\theta_j)\} / 192 \quad (12)$$

以上のように、いずれの結晶軸を光軸としても、 $R_j'$ 中の $\{1 - \cos(4\theta_j)\}$ を含む項の係数と、 $S_j'$ 中の $\{1 - \cos(2\theta_j)\}$ を含む項の係数との間には、7 : 4の関係が成立している。また、結晶軸 $[111]$ が光軸である結晶レンズと、結

晶軸  $[001]$  が光軸である結晶レンズと、結晶軸  $[011]$  が光軸である結晶レンズとの間には、 $R_j'$  の値および  $S_j'$  の値のいずれに関しても、 $8:-12:3$  の関係が成立している。

したがって、同じ結晶軸を光軸とするレンズ群を光軸中心に相對回轉させてそれらの回轉非對稱成分を相殺する場合には、結晶軸  $[111]$  が光軸であるレンズ群内の光路長の總和  $\Sigma L_{111}$  と、結晶軸  $[001]$  が光軸であるレンズ群内の光路長の總和  $\Sigma L_{001}$  と、結晶軸  $[011]$  が光軸であるレンズ群内の光路長の總和  $\Sigma L_{011}$  との間で次の式 (13) に示す關係を満たすときに、 $\Sigma R_j$  および  $\Sigma S_j$  を共に 0 にすることができる。

$$8 \times \Sigma L_{111} - 12 \times \Sigma L_{001} + 3 \times \Sigma L_{011} = 0 \quad (13)$$

第 1 實施形態にかかる投影光学系 100 の場合、結晶軸  $[001]$  が光軸である結晶レンズ (105, 106) と、結晶軸  $[111]$  が光軸である結晶レンズ (109, 110) とを含み、結晶軸  $[011]$  が光軸である結晶レンズは含んでいない。したがって、結晶レンズ 105 と結晶レンズ 106 とを互いにほぼ等しい厚さとし、且つ双方のレンズを光軸中心に 45 度または 135 度だけ相對回轉させる。また、結晶レンズ 109 と結晶レンズ 110 とを互いにほぼ等しい厚さとし、且つ双方のレンズを光軸中心に 60 度または 180 度だけ相對回轉させる。

そして、結晶軸  $[001]$  が光軸であるレンズ群 (105, 106) と結晶軸  $[111]$  が光軸であるレンズ群 (109, 110) との間で複屈折の回轉非對稱分を相殺する場合、結像光路 105m と 106m との光路長の總和  $\Sigma L_{001}$  と、結像光路 109m と 110m との光路長の總和  $\Sigma L_{111}$  との間で次の式 (14) に示す關係を満たすときに、 $\Sigma R_j$  および  $\Sigma S_j$  を共に 0 にすることができる。

$$8 \times \Sigma L_{111} - 12 \times \Sigma L_{001} = 0 \quad (14)$$

すなわち、結晶レンズ 105 と 106 との厚さの總和と、結晶レンズ 109 と 110 との厚さの總和との比を概ね 2:3 に設定すると、複屈折の影響を極小にすることができる。なお、上述の例では、結像光束内の各結像光線について、 $\Sigma$

$R_j$  および  $\Sigma S_j$  がともに 0 に一致している。しかしながら、 $\Sigma R_j$  および  $\Sigma S_j$  を必ずしも常に 0 に一致させる必要はなく、各結像光線について  $\Sigma R_j$  および  $\Sigma S_j$  を所定の値にほぼ一致させれば良い。そして、その所定の値を中心とした  $\Sigma R_j$  および  $\Sigma S_j$  のばらつきが、上述したように、例えば  $\lambda/2$  や  $\lambda/20$  の範囲に収まるように、各結晶レンズの結晶軸、回転角度  $\rho_j$ 、すべてのレンズの厚さ、曲率半径、間隔等を設定することにより、複屈折の悪影響を極小に抑えた光学系を実現することが可能である。

なお、上述の第 1 実施形態のように、それぞれ回転非対称性を相殺したレンズ群の組み合わせによって光学系全体での複屈折の悪影響を除去する方法が、本発明における複屈折の悪影響の低減方法の一例に過ぎないことは、言うまでもない。すなわち、上記のような回転レンズ群の組み合わせに限定されることなく、光学系全体として、第 1 の総和評価量  $\Sigma R_j$  と第 2 の総和評価量  $\Sigma S_j$  とが像面または物体面上の任意の 1 点に集光する光束について等しくなるように設定すれば、他のどのような手法を用いても良いことは言うまでもない。

第 6 図は、本発明の第 2 実施形態にかかる投影光学系の構成を概略的に示す図である。第 2 実施形態では、波長が 157 nm の  $F_2$  レーザーに対して収差補正が最適化された反射屈折型の投影光学系に本発明を適用している。第 2 実施形態の投影光学系 200（第 1 図の投影光学系 300 に対応）では、レチクル 201（第 1 図のレチクル 101 に対応）上の 1 点を射出した光束が、光軸 AX 200a に沿って配置されたレンズ 204 を介して、光路変更手段としてのミラーブロック 203 に入射する。

ミラーブロック 203 の平面ミラー 203a で反射された光束は、光軸 AX 200b に沿って配置されたレンズ 205 および 206 を介して、凹面反射鏡 220 に入射する。凹面反射鏡 220 で反射された光束は、レンズ 206 および 205 を介して、ミラーブロック 203 に再び入射する。ミラーブロック 203 の平面ミラー 203b で反射された光束は、光軸 AX 200a に沿って配置されたレンズ 207～212 を介して、ウエハ 202（第 1 図のウエハ 102 に対応）上の 1 点に集光する。こうして、ウエハ 202 上には、レチクル 201 に描画され

たパターンの投影像が形成される。第2実施形態では、すべてのレンズ204～212がフッ化カルシウム結晶（蛍石）で形成されている。

このような反射屈折光学系においても、本発明の総和評価量 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ によって、投影光学系200の複屈折の影響を算定することが可能であり、本発明による評価量 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ に基づいて投影光学系200の複屈折の悪影響を極小に抑えることが可能である。ただし、第2実施形態にかかる反射屈折光学系では、一部の結晶レンズが他の結晶レンズとは異なる光軸上に配置されること、平面ミラー203a、203bや凹面反射鏡220の反射作用によって、各結晶レンズの光軸を中心とした回転角度の基準となるX軸の方向も変動すること、および結晶レンズ205、206については結像光路がその中を往復することが、第1実施形態の場合と相違する。

以下、反射屈折型の投影光学系200におけるXYZ軸の設定について説明する。まず、第6図に示すように、レチクル201の近傍において光軸AX200aに沿って配置された結晶レンズ204については、第1実施形態と同様に、X0Y0Z0座標系を設定している。すなわち、露光光の進行方向である光軸AX200aに沿った下向きを+Z0軸の方向とし、第6図の紙面において水平右向きを+X0軸の方向とし、紙面手前向きを+Y0軸の方向と設定している。この場合、X0Y0Z0座標系は右手系である。こうして、結晶レンズ204については、X0Y0Z0座標系を基準として上記の角度 $\theta_j$ 、 $\rho_j$ 、 $\phi_j$ を求め、それらを式(1)～(6)に代入することにより、評価量 $R_j$ および $S_j$ を算出する。

次に、結像光束が平面ミラー203aで反射された後は、光束の進行方向が図中右向きになるので、この光束の進行方向を+Z1軸としてX1Y1Z1座標系を設定する。この場合、X1Y1Z1座標系は、平面ミラー203aの反射作用によって左手座標系（以下、単に「左手系」という）に変換される。すなわち、露光光の進行方向である光軸AX200bに沿った右向きを+Z1軸の方向とし、図中下向きを+X1軸の方向とし、紙面手前向きを+Y1軸の方向と設定する。こうして、結晶レンズ205、206を右向きに透過する結像光束については、

$X_1 Y_1 Z_1$ 座標系を基準として上記の角度 $\theta_j$ ,  $\rho_j$ ,  $\phi_j$ を求め、それらを式(1)～(6)に代入することにより、評価量 $R_j$ および $S_j$ を算出する。

ただし、この場合には、 $X_1 Y_1 Z_1$ 座標系が左手系であるため、第4図および第5図に示す角度 $\rho_j$ および $\phi_j$ の符号の採り方に注意する必要がある。すなわち、左手系である $X_1 Y_1 Z_1$ 座標系の場合、 $X$ 軸、 $Z$ 軸および $X'$ 軸、 $Z'$ 軸をそれぞれ第4図および第5図に合わせて固定すると、 $Y$ 軸および $Y'$ 軸が第4図および第5図の向きとは逆向きになる。回転角度 $\rho_j$ および角度 $\phi_j$ の定義は $X$ 軸( $X'$ 軸)から $Y$ 軸( $Y'$ 軸)方向への回転方向を正としているので、左手系である $X_1 Y_1 Z_1$ 座標系においては回転の正方向も第4図および第5図に示す方向とは逆向きになる。ただし、 $X_1$ 軸から $Y_1$ 軸方向への回転方向が正であることに変わりはない。

次いで、結像光束が凹面反射鏡220で反射されると、光束の進行方向が図中左向きになるので、この光束の進行方向を $+Z_2$ 軸として $X_2 Y_2 Z_2$ 座標系を設定する。この場合、 $X_2 Y_2 Z_2$ 座標系は、凹面反射鏡220の反射作用によって右手系に戻る。すなわち、露光光の進行方向である光軸 $AX_2OOb$ に沿った左向きを $+Z_2$ 軸の方向とし、図中上向きを $+X_2$ 軸の方向とし、紙面奥向きを $+Y_2$ 軸の方向と設定する。こうして、結晶レンズ205, 206を左向きに透過する結像光束については、 $X_2 Y_2 Z_2$ 座標系を基準として上記の角度 $\theta_j$ ,  $\rho_j$ ,  $\phi_j$ を求め、それらを式(1)～(6)に代入することにより、評価量 $R_j$ および $S_j$ を算出する。

なお、結晶レンズ205, 206では、光束の進行方向に結晶軸 $[001]$ (または結晶軸 $[111]$ ,  $[011]$ )を一致させるとしているので、結晶レンズ205, 206中を光束が右向きに進む場合と左向きに進む場合とでは、各結晶軸の符号が反転することに注意する必要がある。すなわち、光束が右向きに進む場合に $[111]$ であった結晶軸は、光束が左向きに進む場合には結晶軸 $[-1-1-1]$ として扱うことになる。同様に、結晶軸 $[100]$ は結晶軸 $[-100]$ として、結晶軸 $[1-10]$ は結晶軸 $[-110]$ として扱うことになる。

最後に、結像光束が平面ミラー203bで反射された後は、光束の進行方向が

図中下向きに戻るの、この光束の進行方向を $+Z_3$ 軸として $X_3Y_3Z_3$ 座標系を設定する。この場合、 $X_3Y_3Z_3$ 座標系は、平面ミラー203bの反射作用によって左手系に再び変換される。すなわち、露光光の進行方向である光軸 $AX_{200}a$ に沿った下向きを $+Z_3$ 軸の方向とし、図中右向きを $+X_3$ 軸の方向とし、紙面奥向きを $+Y_3$ 軸の方向と設定する。こうして、結晶レンズ207～212については、 $X_3Y_3Z_3$ 座標系を基準として上記の角度 $\theta_j$ 、 $\rho_j$ 、 $\phi_j$ を求め、それらを式(1)～(6)に代入することにより、評価量 $R_j$ および $S_j$ を算出する。なお、 $X_3Y_3Z_3$ 座標系は左手系であるため、角度 $\rho_j$ および $\phi_j$ の算出方法は、結晶レンズ205、206を右向きに透過する光束の場合と同じである。

こうして求まった各結晶レンズの評価量 $R_j$ および $S_j$ をそれぞれ加算して得られる総和評価量 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ を、反射屈折型の投影光学系200における複屈折の影響度の指標として用いることができることは、第1実施形態にかかる屈折型の投影光学系100の場合と同様である。また、レチクル201上の1点を発してウエハ202上の1点に収束する結像光束内のすべての結像光線について、総和評価量 $\Sigma R_j$ および $\Sigma S_j$ の所定の値を中心としたばらつきが例えば $\lambda/2$ や $\lambda/20$ の範囲に収まるように、各結晶レンズの結晶軸、回転角度 $\rho_j$ 、すべてのレンズの厚さ、曲率半径、間隔等を設定することにより、複屈折の悪影響を極小に抑えた光学系を実現することが可能であることも、第1実施形態にかかる屈折型の投影光学系100の場合と同様である。

なお、第2実施形態にかかる投影光学系200では、凹面反射鏡220の近傍に配置される結晶レンズ205、206については、蛍石の結晶軸 $[111]$ を光軸 $AX_{200}b$ と一致させ、且つ結晶軸 $[1-10]$ を光軸中心に60度または180度だけ相対回転させて配置する。また、結晶レンズ204、207、208、209については、蛍石の結晶軸 $[011]$ を光軸 $AX_{200}a$ と一致させ、且つ結晶軸 $[100]$ が光軸を中心に45度ずつ離れるように相対回転させて配置する。

さらに、結晶レンズ211、212については、蛍石の結晶軸 $[001]$ を光



軸  $AX200a$  と一致させ、且つ結晶軸  $[100]$  の方向を一致させて配置する。そして、結晶レンズ  $210$  については、蛍石の結晶軸  $[001]$  を光軸  $AX200a$  と一致させ、結晶軸  $[100]$  の方向を結晶レンズ  $211$ ,  $212$  の結晶軸  $[100]$  の方向に対して光軸中心に  $45$  度または  $135$  度だけ相対回転させて配置する。こうして、レチクル  $201$  上の  $1$  点を発してウエハ  $202$  上の  $1$  点に収束する結像光束内のすべての結像光線について、総和評価量  $\Sigma R_j$  および  $\Sigma S_j$  の値を所定の範囲内に設定することが容易になる。

なお、上述の第  $1$  実施形態および第  $2$  実施形態では、本発明の説明を簡略化するために、レチクル  $101$  ( $201$ ) 上の  $1$  点を発した結像光束についてのみ着目している。しかしながら、良好な結像性能を得るためには、レチクル  $101$  ( $201$ ) 上の有効照明エリア内の全ての点からウエハ  $102$  ( $202$ ) 上の有効露光エリア内に達する結像光束について、本発明の上記関係を満たすべきであることは言うまでもない。

また、上述の各実施形態では、複屈折性の光学材料としてフッ化カルシウム結晶 (蛍石) を用いているが、これに限定されることなく、他の一軸性結晶、たとえばフッ化バリウム結晶 ( $BaF_2$ )、フッ化リチウム結晶 ( $LiF$ )、フッ化ナトリウム結晶 ( $NaF$ )、フッ化ストロンチウム結晶 ( $SrF_2$ )、フッ化ベリリウム結晶 ( $BeF_2$ ) など、紫外線に対して透明な他の結晶材料を用いることもできる。このうち、フッ化バリウム結晶は、すでに直径  $200\text{mm}$  を越す大型の結晶材料も開発されており、レンズ材料として有望である。この場合、フッ化バリウム ( $BaF_2$ ) などの結晶軸方位も本発明に従って決定されることが好ましい。

さらに、上述の各実施形態では、投影光学系に本発明を適用しているが、これに限定されることなく、投影光学系を検査するための光学系、例えば収差計測用光学系に本発明を適用することもできる。また、本発明を適用する光学系のタイプによっては、上記実施形態のように物体面から像面へ像を形成する光学系とは異なり、物体面から瞳面までの光学系や平行光束を像面へ集光する光学系の構成となる場合もある。この場合には、上記実施形態のようにレチクル  $101$  ( $20$

1) 上の1点からウエハ102(202)上の1点に至る結像光束は存在し得ないが、この結像光束を物体面上の1点から瞳面に至る結像光束または像面の1点へ集光する結像光束としてとらえることにより、本発明を上述の実施形態と同様に適用することができることは明らかである。

上述の各実施形態の露光装置では、照明装置によってレチクル(マスク)を照明し(照明工程)、投影光学系を用いてマスクに形成された転写用のパターンを感光性基板に露光する(露光工程)ことにより、マイクロデバイス(半導体素子、撮像素子、液晶表示素子、薄膜磁気ヘッド等)を製造することができる。以下、各実施形態の露光装置を用いて感光性基板としてのウエハ等に所定の回路パターンを形成することによって、マイクロデバイスとしての半導体デバイスを得る際の手法の一例につき第7図のフローチャートを参照して説明する。

先ず、第7図のステップ301において、1ロットのウエハ上に金属膜が蒸着される。次のステップ302において、その1ロットのウエハ上の金属膜上にフォトリソが塗布される。その後、ステップ303において、各実施形態の露光装置を用いて、マスク上のパターンの像がその投影光学系を介して、その1ロットのウエハ上の各ショット領域に順次露光転写される。その後、ステップ304において、その1ロットのウエハ上のフォトリソの現像が行われた後、ステップ305において、その1ロットのウエハ上でレジストパターンをマスクとしてエッチングを行うことによって、マスク上のパターンに対応する回路パターンが、各ウエハ上の各ショット領域に形成される。

その後、更に上のレイヤの回路パターンの形成等を行うことによって、半導体素子等のデバイスが製造される。上述の半導体デバイス製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する半導体デバイスをスループット良く得ることができる。なお、ステップ301～ステップ305では、ウエハ上に金属を蒸着し、その金属膜上にレジストを塗布、そして露光、現像、エッチングの各工程を行っているが、これらの工程に先立って、ウエハ上にシリコンの酸化膜を形成後、そのシリコンの酸化膜上にレジストを塗布、そして露光、現像、エッチング等の各工程を行っても良いことはいうまでもない。

また、各実施形態の露光装置では、プレート（ガラス基板）上に所定のパターン（回路パターン、電極パターン等）を形成することによって、マイクロデバイスとしての液晶表示素子を得ることもできる。以下、第8図のフローチャートを参照して、このときの手法の一例につき説明する。第8図において、パターン形成工程401では、各実施形態の露光装置を用いてマスクのパターンを感光性基板（レジストが塗布されたガラス基板等）に転写露光する、所謂光リソグラフィ工程が実行される。この光リソグラフィ工程によって、感光性基板上には多数の電極等を含む所定パターンが形成される。その後、露光された基板は、現像工程、エッチング工程、レジスト剥離工程等の各工程を経ることによって、基板上に所定のパターンが形成され、次のカラーフィルター形成工程402へ移行する。

次に、カラーフィルター形成工程402では、R（Red）、G（Green）、B（Blue）に対応した3つのドットの組がマトリックス状に多数配列されたり、またはR、G、Bの3本のストライプのフィルターの組を複数水平走査線方向に配列されたりしたカラーフィルターを形成する。そして、カラーフィルター形成工程402の後に、セル組み立て工程403が実行される。セル組み立て工程403では、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板、およびカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルター等を用いて液晶パネル（液晶セル）を組み立てる。セル組み立て工程403では、例えば、パターン形成工程401にて得られた所定パターンを有する基板とカラーフィルター形成工程402にて得られたカラーフィルターとの間に液晶を注入して、液晶パネル（液晶セル）を製造する。

その後、モジュール組み立て工程404にて、組み立てられた液晶パネル（液晶セル）の表示動作を行わせる電気回路、バックライト等の各部品を取り付けて液晶表示素子として完成させる。上述の液晶表示素子の製造方法によれば、極めて微細な回路パターンを有する液晶表示素子をスループット良く得ることができる。

なお、上述の各実施形態では、露光装置に搭載される投影光学系に対して本発明を適用しているが、これに限定されることなく、他の一般的な光学系に対して

本発明を適用することもできる。また、上述の各実施形態では、193 nmの波長光を供給するArFエキシマレーザー光源や157 nmの波長光を供給するF<sub>2</sub>レーザー光源を用いているが、これに限定されることなく、たとえば126 nmの波長光を供給するArレーザー光源などを用いることもできる。

#### 産業上の利用の可能性

以上説明したように、本発明では、たとえば蛍石のような複屈折性の結晶材料を用いても、複屈折の影響を実質的に受けることなく良好な光学性能を有する光学系を実現することができる。したがって、本発明の光学系を露光装置に組み込むことにより、高解像な投影光学系を介した高精度な投影露光により、良好なマイクロデバイスを製造することができる。

## 請 求 の 範 囲

1. 立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記複数の結晶光学素子は、第1結晶軸が前記光学系の光軸にほぼ一致するように設定された結晶光学素子と、前記第1結晶軸とは異なる第2結晶軸が前記光軸にほぼ一致するように設定された結晶光学素子とを備え、

前記複数の結晶光学素子 $G_j$ は、前記光軸と直交する面内にある所定の結晶軸の方向が、前記面内にある所定の軸の方向に対して、前記光軸を中心として角度 $\rho_j$ 回転して配置され、

前記複数の結晶光学素子 $G_j$ を通過する特定の光線について、該特定の光線が前記光軸の方向となす角度を $\theta_j$ とし、前記特定の光線が前記所定の軸の方向となす角度を $\phi_j$ とし、前記特定の光線の光路長を $L_j$ としたとき、前記結晶の物性定数 $\alpha$ と、前記光軸とほぼ一致する結晶軸と、前記角度 $\rho_j$ と、前記角度 $\theta_j$ と、前記角度 $\phi_j$ と、前記光路長 $L_j$ とから定まる第1の所定の偏光に対する第1の評価量 $R_j$ および第2の所定の偏光に対する第2の評価量 $S_j$ が規定され、

前記複数の結晶光学素子に関する前記第1の評価量 $R_j$ の総和である第1の総和評価量 $\Sigma R_j$ と、前記複数の結晶光学素子に関する前記第2の評価量 $S_j$ の総和である第2の総和評価量 $\Sigma S_j$ とが、前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結像光束中の光線について所定の関係にあることを特徴とする光学系。

2. 請求の範囲第1項に記載の光学系において、

前記第1の評価量 $R_j$ は、前記第1の所定の偏光に対する光路長変化情報であり、前記第2の評価量 $S_j$ は、前記第2の所定の偏光に対する光路長変化情報であることを特徴とする光学系。

3. 請求の範囲第1項または第2項に記載の光学系において、

前記所定の関係は、前記第 1 の評価量  $R_j$  の総和が前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の 1 点に集光する結像光束中の光線についてほぼ等しい関係と、前記第 2 の総和評価量  $\Sigma S_j$  が前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の 1 点に集光する結像光束中の光線についてほぼ等しい関係と、前記第 1 の評価量  $R_j$  の総和と前記第 2 の総和評価量  $\Sigma S_j$  とが前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の 1 点に集光する結像光束中の光線について互いにほぼ等しい関係との少なくとも 1 つを含むことを特徴とする光学系。

4. 請求の範囲第 1 項乃至第 3 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸  $[1\ 1\ 1]$  または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された結晶光学素子  $G_j$  において、前記所定の結晶軸は結晶軸  $[-1\ 1\ 0]$  または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸であり、 $\omega_j = \phi_j - \rho_j$  としたとき、前記第 1 の評価量  $R_j$  および前記第 2 の評価量  $S_j$  は、

$$R_j = \alpha \times L_j \times [56 \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} - 32\sqrt{2} \times \sin(4\theta_j) \times \sin(3\omega_j)] / 192$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times [32 \times \{1 - \cos(2\theta_j)\} + 64\sqrt{2} \times \sin(2\theta_j) \times \sin(3\omega_j)] / 192$$

の式でそれぞれ表されることを特徴とする光学系。

5. 請求の範囲第 1 項乃至第 4 項のいずれか 1 項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸  $[0\ 0\ 1]$  または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された結晶光学素子  $G_j$  において、前記所定の結晶軸は結晶軸  $[1\ 1\ 0]$  または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸であり、 $\omega_j = \phi_j - \rho_j$  としたとき、前記第 1 の評価量  $R_j$  および前記第 2 の評価量  $S_j$  は、

$$R_j = \alpha \times L_j \times \{1 - \cos(4\theta_j)\} \times \{-84 - 12 \times \cos(4\omega_j)\} / 192$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times \{1 - \cos(2\theta_j)\} \times \{-48 + 48 \times \cos(4\omega_j)\} / 192$$

の式でそれぞれ表されることを特徴とする光学系。

6. 請求の範囲第1項乃至第5項のいずれか1項に記載の光学系において、  
前記光軸と結晶軸〔0 1 1〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された結晶光学素子G<sub>j</sub>において、前記所定の結晶軸は結晶軸〔1 0 0〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸であり、 $\omega_j = \phi_j - \rho_j$ としたとき、前記第1の評価量R<sub>j</sub>および前記第2の評価量S<sub>j</sub>は、

$$R_j = \alpha \times L_j \times \{[1 - \cos(4\theta_j)] \times \{21 - 9 \times \cos(4\omega_j) - 84 \times \cos(2\omega_j)\} + 96 \times \cos(2\omega_j)\} / 192$$

$$S_j = \alpha \times L_j \times \{[1 - \cos(2\theta_j)] \times \{12 + 36 \times \cos(4\omega_j) + 48 \times \cos(2\omega_j)\} - 96 \times \cos(2\omega_j)\} / 192$$

の式でそれぞれ表されることを特徴とする光学系。

7. 請求の範囲第1項乃至第6項のいずれか1項に記載の光学系において、  
前記結晶の物性定数 $\alpha$ は、各結晶光学素子G<sub>j</sub>を形成する結晶中で結晶軸〔0 1 1〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向に進行する光のうち、結晶軸〔1 0 0〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向に偏光方向を有する光の屈折率 $n_{100}$ と、前記結晶軸〔0 - 1 1〕または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向に偏光方向を有する光の屈折率である光の屈折率 $n_{011}$ との差であることを特徴とする光学系。

8. 請求の範囲第1項乃至第7項のいずれか1項に記載の光学系において、  
光の波長を $\lambda$ としたとき、前記第1の総和評価量 $\Sigma R_j$ と前記第2の総和評価量 $\Sigma S_j$ との差の絶対値が、前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結像光束中の光線について $\lambda/2$ よりも小さく設定されていることを特徴とする光学系。

9. 請求の範囲第1項乃至第8項のいずれか1項に記載の光学系において、  
光の波長を $\lambda$ としたとき、前記第1の総和評価量 $\Sigma R_j$ と所定の値との差の絶対値が、前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する

結像光束中の光線について $\lambda/2$ よりも小さく設定されていることを特徴とする光学系。

10. 請求の範囲第1項乃至第9項のいずれか1項に記載の光学系において、

光の波長を $\lambda$ としたとき、前記第2の総和評価量 $\Sigma S_j$ と所定の値との差の絶対値が、前記光学系の像面上または物体面上の少なくとも任意の1点に集光する結像光束中の光線について $\lambda/2$ よりも小さく設定されていることを特徴とする光学系。

11. 立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[111]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $M$  ( $M$ は3以上の整数) 枚の結晶光学素子を含み、

前記 $M$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に略垂直な面内にある結晶軸 $[1-10]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(120/M)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

12. 請求の範囲第11項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[001]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $N$  ( $N$ は3以上の整数) 枚の結晶光学素子をさらに含み、

前記 $N$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(90/N)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

13. 請求の範囲第11項または第12項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[011]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ



一致するように設定された $L$  ( $L$ は3以上の整数) 枚の結晶光学素子をさらに含み、

前記 $L$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(180/L)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

14. 請求の範囲第11項乃至第13項のいずれか1項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[011]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $P$  ( $P$ は2以上の整数) 枚の結晶光学素子をさらに含み、

前記 $P$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(90/P)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

15. 立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[001]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とが互いにほぼ一致するように設定された $N$  ( $N$ は3以上の整数) 枚の結晶光学素子を含み、

前記 $N$ 枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(90/N)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

16. 請求の範囲第15項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[011]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定された $L$  ( $L$ は3以上の整数) 枚の結晶光学素子をさらに含み、

前記L枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(180/L)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

17. 請求の範囲第15項または第16項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[011]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定されたP（Pは2以上の整数）枚の結晶光学素子をさらに含み、

前記P枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(90/P)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

18. 立方晶系に属する結晶で形成された複数の結晶光学素子を含む光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[011]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定されたL（Lは3以上の整数）枚の結晶光学素子を含み、

前記L枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(180/L)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

19. 請求の範囲第18項に記載の光学系において、

前記光軸と結晶軸 $[011]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸とがほぼ一致するように設定されたP（Pは2以上の整数）枚の結晶光学素子をさらに含み、

前記P枚の結晶光学素子は、前記光軸に垂直な面内にある結晶軸 $[100]$ または該結晶軸と光学的に等価な結晶軸の方向が前記光軸を中心として互いにほぼ $(90/P)$ 度ずつ離れた回転位置関係を有することを特徴とする光学系。

20. 請求の範囲第1項乃至第19項のいずれか1項に記載の光学系において、前記結晶はフッ化カルシウム結晶またはフッ化バリウム結晶であることを特徴とする光学系。

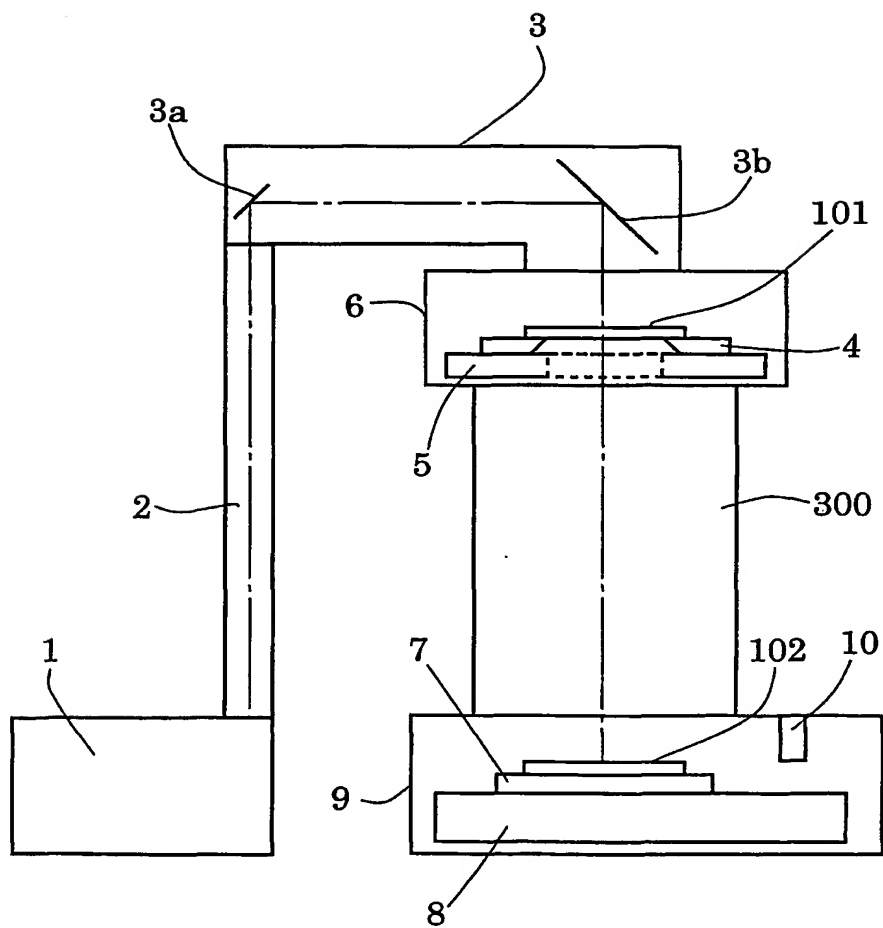
21. マスクを照明するための照明系と、  
前記マスクに形成されたパターンの像を感光性基板上に形成するための請求の範囲第1項乃至第20項のいずれか1項に記載の光学系とを備えていることを特徴とする露光装置。

22. 請求の範囲第21項に記載の露光装置を用いて前記マスクのパターンを前記感光性基板に露光する露光工程と、

前記露光工程により露光された前記感光性基板を現像する現像工程とを含むことを特徴とするマイクロデバイスの製造方法。

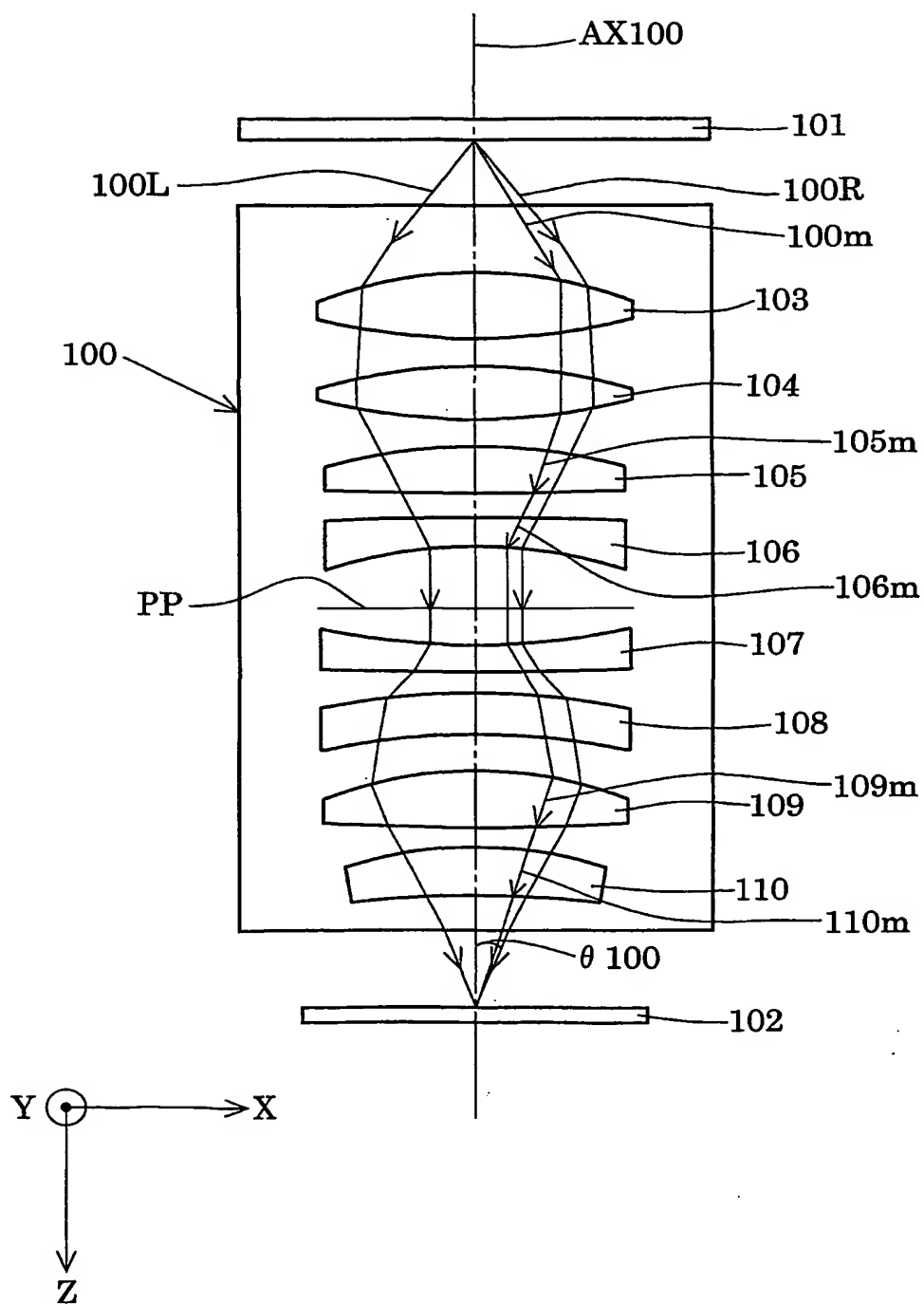
1 / 8

第 1 図

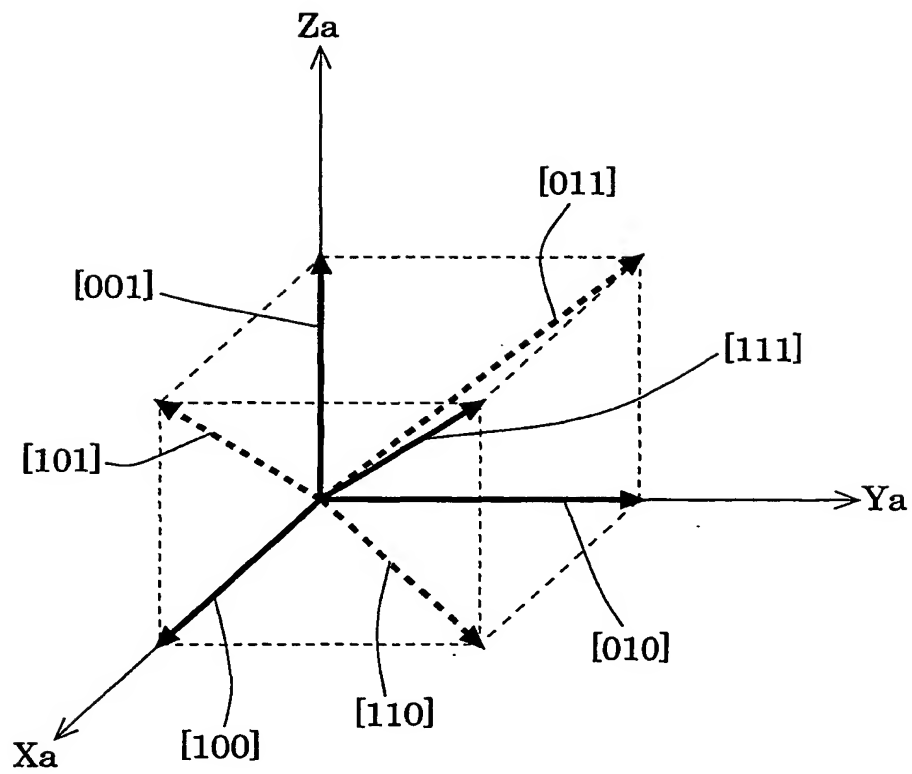


2 / 8

第 2 図

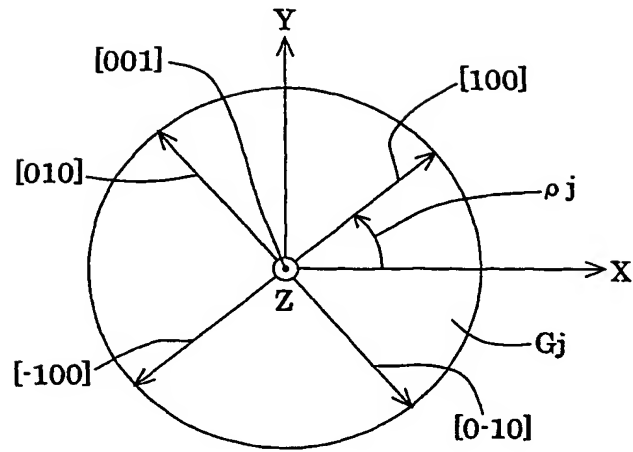


第 3 図

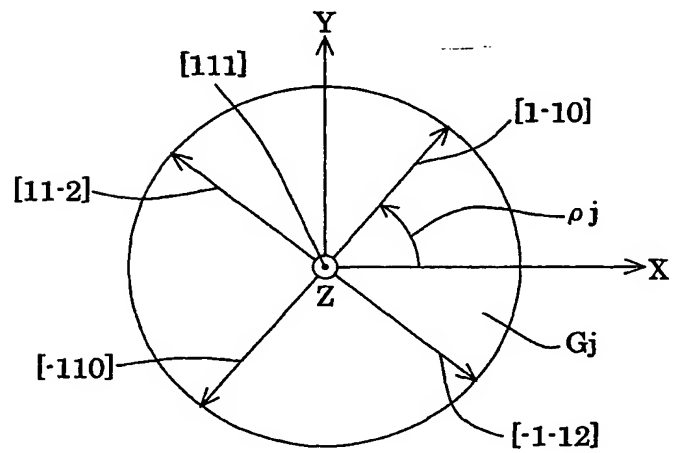


4 / 8

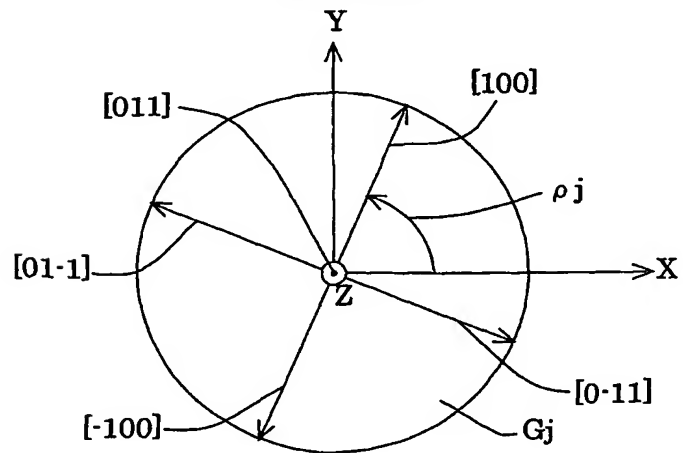
第 4 A 図



第 4 B 図

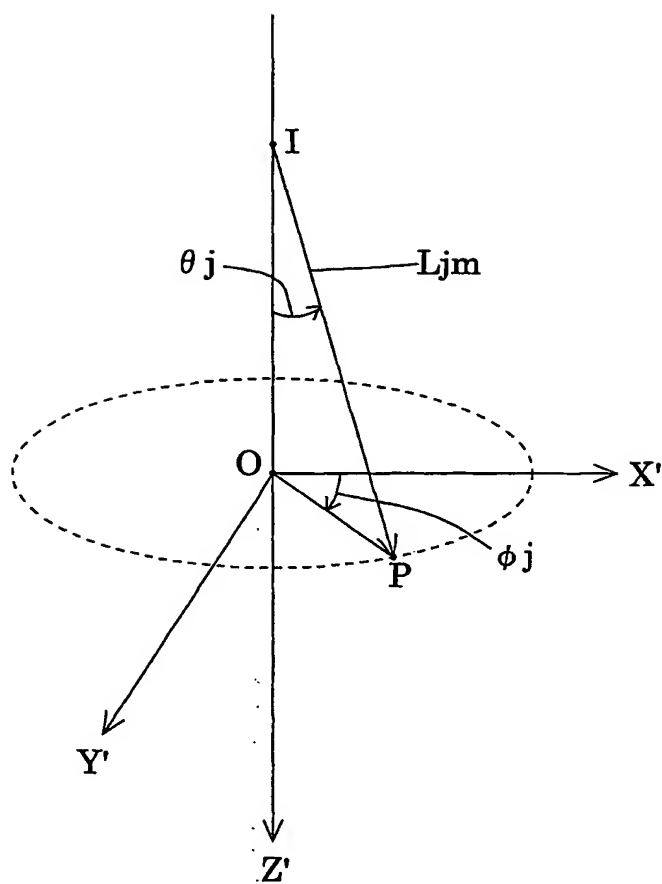


第 4 C 図



5 / 8

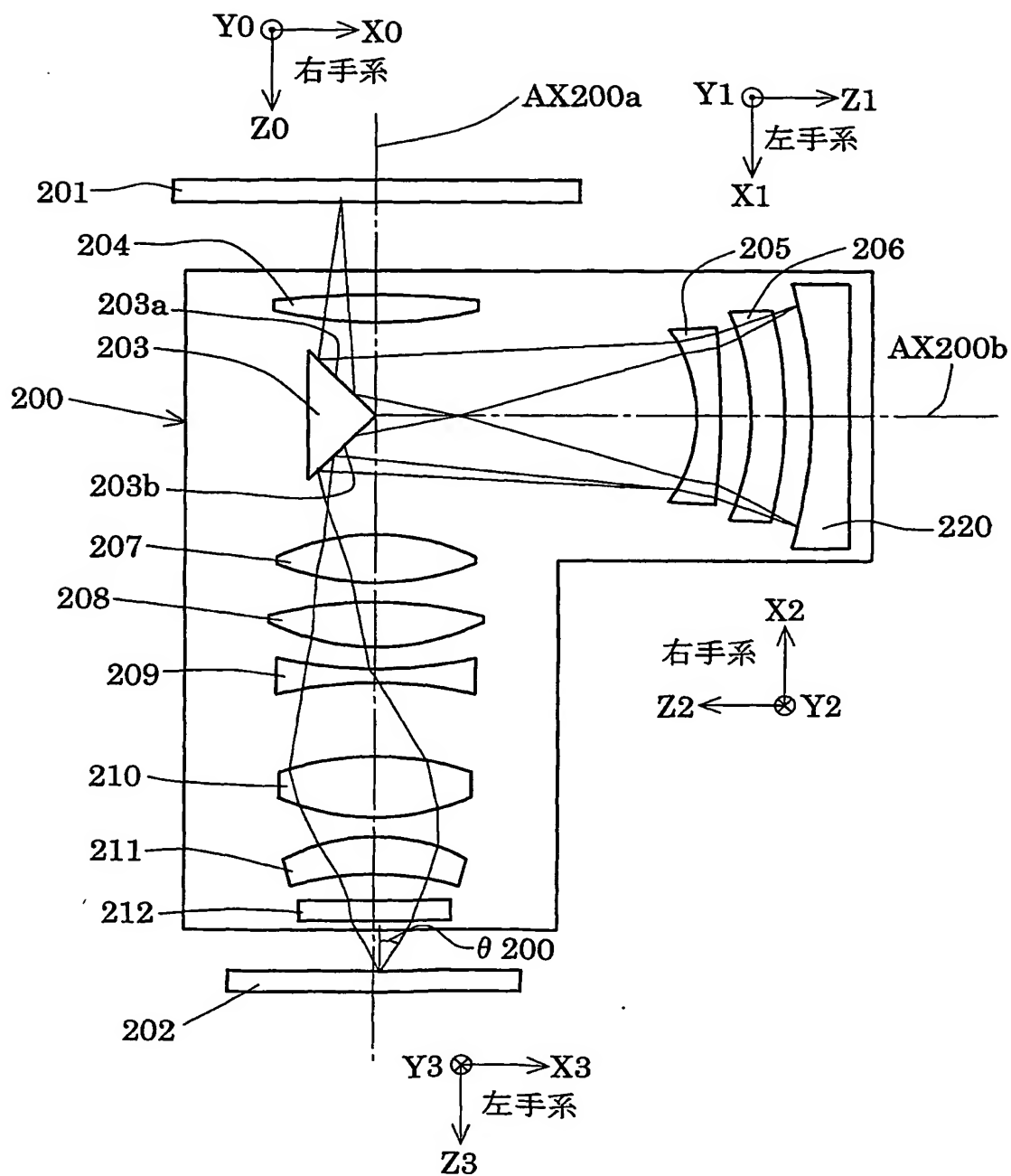
第 5 図





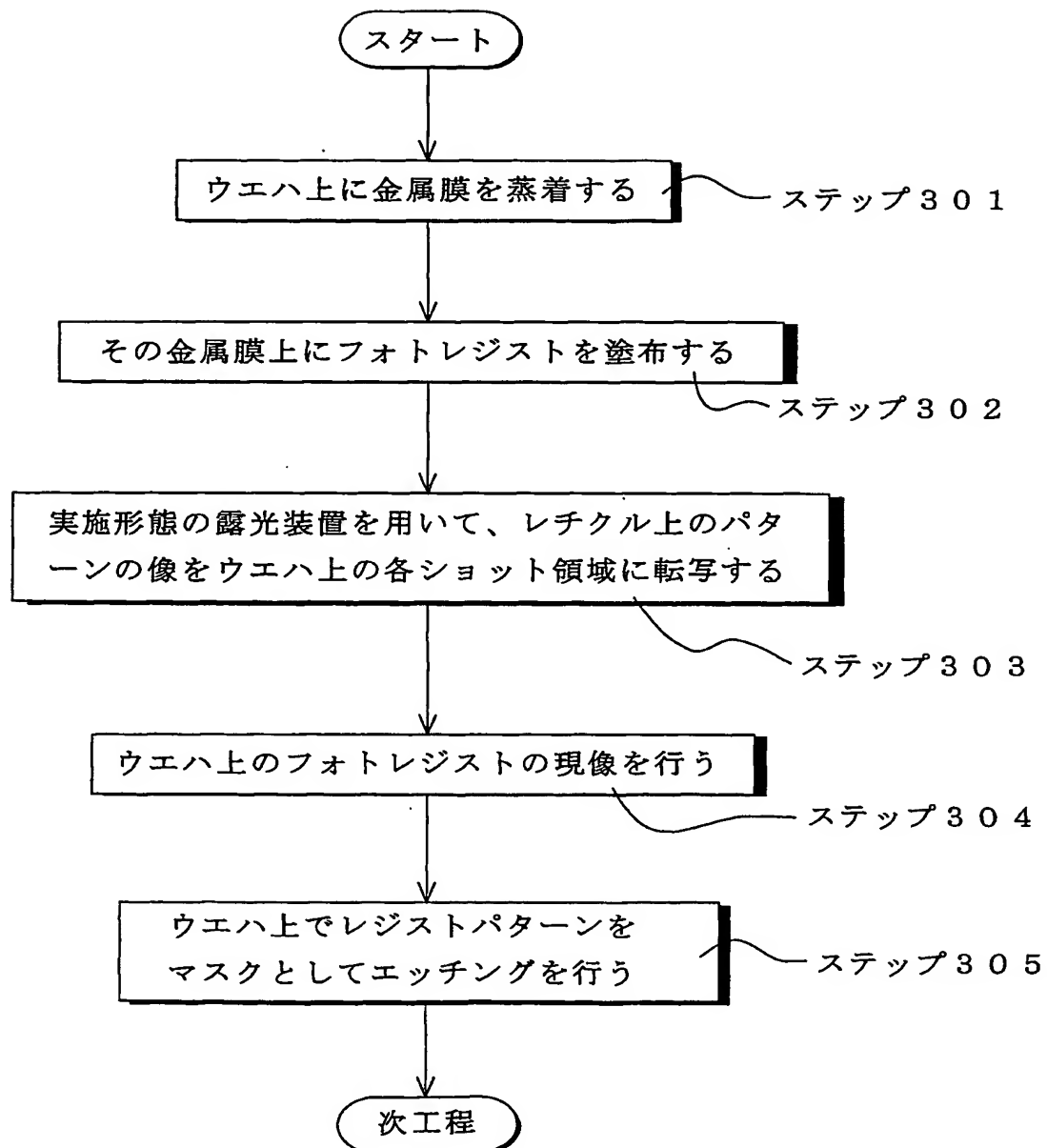
6 / 8

第 6 図



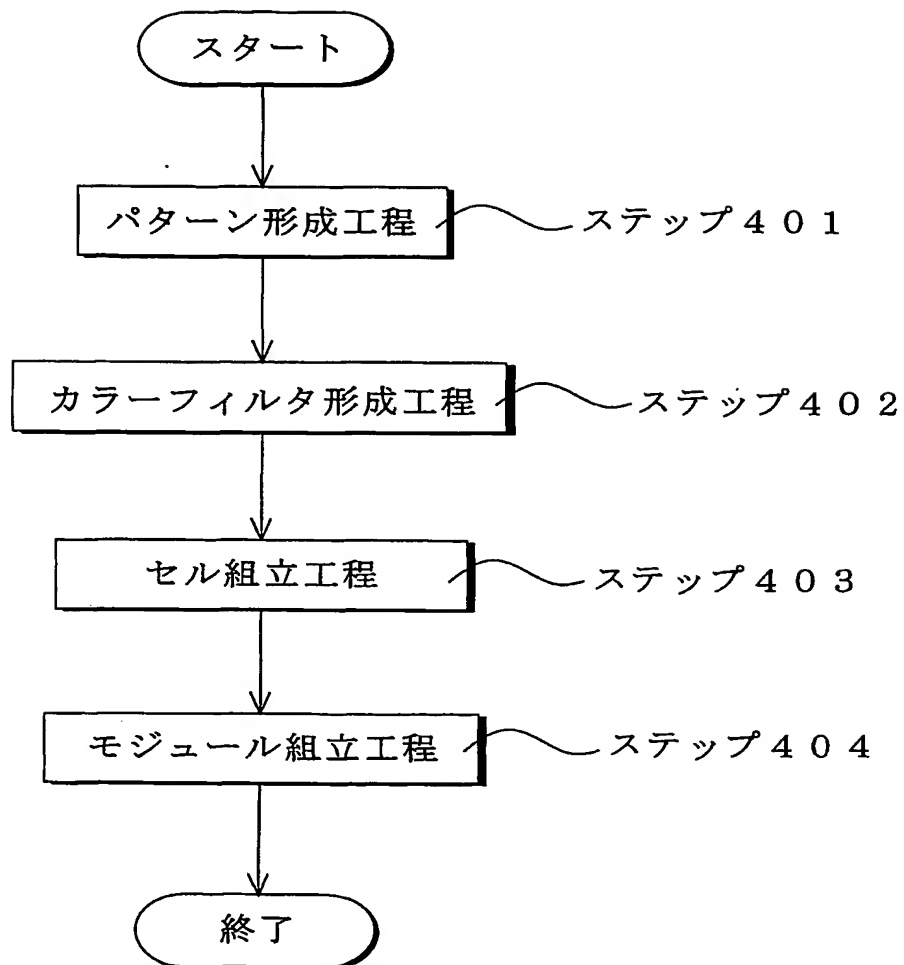
7 / 8

## 第7図



8 / 8

第 8 図



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/06964

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl<sup>7</sup> G02B13/24, G02B13/14, G02B17/08, H01L21/027

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl<sup>7</sup> G02B13/24, G02B13/14, G02B17/08, H01L21/027

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1926-1996	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2002
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2002	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2002

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 00/41226 A1 (Nikon Corp.), 13 July, 2000 (13.07.00), Full text; all drawings & AU 200018912 A & EP 1063684 A1 & CN 1293822 A & KR 2001088279 A & US 6366404 B1 & US 2002/0085176 A1	1-22
A	JP 8-107060 A (Nikon Corp.), 23 April, 1996 (23.04.96), Full text; all drawings (Family: none)	1-22
A	JP 2000-331927 A (Canon Inc.), 30 November, 2000 (30.11.00), Full text; all drawings (Family: none)	1-22

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not

considered to be of particular relevance

"E" earlier document but published on or after the international filing

date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is

cited to establish the publication date of another citation or other

special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other

means

"P" document published prior to the international filing date but later

than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or

priority date and not in conflict with the application but cited to

understand the principle or theory underlying the invention

document of particular relevance; the claimed invention cannot be

considered novel or cannot be considered to involve an inventive

step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be

considered to involve an inventive step when the document is

combined with one or more other such documents, such

combination being obvious to a person skilled in the art

"&amp;" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
30 August, 2002 (30.08.02)Date of mailing of the international search report  
17 September, 2002 (17.09.02)Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP02/06964

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 11-54411 A (Canon Inc.), 26 February, 1999 (26.02.99), Full text; all drawings (Family: none)	1-22
A	WO 00/64825 A1 (Nikon Corp.), 02 November, 2000 (02.11.00), Full text; all drawings & EP 1114802 A1	1-22

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G02B 13/24, G02B 13/14, G02B 17/08,  
H01L 21/027

## B. 調査を行った分野

## 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int. Cl<sup>7</sup> G02B 13/24, G02B 13/14, G02B 17/08,  
H01L 21/027

## 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報 1926-1996年  
 日本国公開実用新案公報 1971-2002年  
 日本国登録実用新案公報 1994-2002年  
 日本国実用新案登録公報 1996-2002年

## 国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	WO 00/41226 A1 (株式会社ニコン) 2000.07.13、全文、全図 & AU 200018912 A & EP 1063684 A1 & CN 1293822 A & KR 2001088279 A & US 6366404 B1 & US 2002/0085176 A1	1-22
A	JP 8-107060 A (株式会社ニコン) 1996.04.23、全文、全図 (ファミリーなし)	1-22
A	JP 2000-331927 A (キヤノン株式会社) 2000.11.30、全文、全図 (ファミリーなし)	1-22

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

## の日の後に公表された文献

「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

30.08.02

国際調査報告の発送日

17.09.02

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)  
 郵便番号100-8915  
 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

森内 正明

2V

9222

電話番号 03-3581-1101 内線 3269

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
A	JP 11-54411 A (キヤノン株式会社) 1999. 02. 26、全文、全図 (ファミリーなし)	1-22
A	WO 00/64825 A1 (株式会社ニコン) 2000. 11. 02、全文、全図 & EP 1114802 A1	1-22